



Kuidun hienorakenteen vaikutus äänen absorptioon

Sara Mähönen

Maisterintutkielma

Helsingin yliopisto

Metsätieteiden maisteriohjelma

Metsien ekologia ja käyttö

Helmikuu 2020

Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos/Institution– Department Metsätieteiden osasto, metsätieteiden maisteriohjelma	
Tekijä/Författare – Author Sara Mähönen			
Työn nimi / Arbetets titel – Title Kuidun hienorakenteen vaikutus äänen absorptioon			
Oppiaine /Läroämne – Subject Metsien ekologia ja käyttö			
Työn laji/Arbetets art – Level Maisterintutkielma	Aika/Datum – Month and year Helmikuu 2020	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages 51	
<p>Tiivistelmä/Referat – Abstract</p> <p>Absorptiolevyjä hyödynnetään julkisissa tiloissa parantamaan tilan akustisia ominaisuuksia ja vähentämään kaiuntaa. Absorptiolevyjä käytetään yleensä huokoisia materiaaleja kuten lasivillaa, mineraalivillaa tai polyesteripohjaisia levyjä. Ne ovat kuitenkin yleensä ympäristölle haitallisia ja vaikeasti hävitettäviä. Sellua, vettä ja saippuaa vaahdotamalla eli vaahtorainamalla saadaan muodostettua huokoinen ja ympäristöystävällinen kuitumateriaali, jonka äänen absorptiokyky on samaa luokkaa kuin mineraalivillan. Tämän tutkimuksen tarkoituksena on tutkia vaikuttavtko kuidun fyysiset ja kemialliset ominaisuudet vaahtorainatun sellulevyn absorptiokykyyn. Tarkoituksena on löytää ominaisuuksia, jotka lisäävät äänen absorptiota. Näiden ominaisuuksien avulla pystytään kehittämään parempia absorptiolevyjä uusiutuvasta puuraaka-aineesta.</p> <p>Tutkimuksen raaka-aineina käytettiin lehti- ja havusulfaattisellua eri valkaisun vaiheista sekä liukosellua. Ominaisuuksiltaan erilaisia selluja oli yhteensä kahdeksan. Havuselluissa puulajina toimi mänty ja lehtipuuselluissa koivu. Selluista tutkittiin kuidun pituus ja leveys, kuidun ominaispinta-ala, kemiallinen koostumus sekä huokosten kokoja-kauma ja keskihalkaisija. Näytteiden valmistuksessa käytettiin vaahtorainaus menetelmää, jossa sellua vaahdotettiin veden ja vaahdotusaineen kanssa. Vaahto asetettiin vettä läpäisevän metalliverkon päälle muottiin ja kuivattiin. Lopputuloksena oli kevyt ja huokoinen kuiduista muodostunut levy. Levyistä leikattiin näytteitä, joista mitattiin äänen absorptiokerroin impedanssiputken avulla.</p> <p>Tutkimuksessa huomattiin, että näytteen tiheys vaikutti eniten absorptiokertoimeen. Näytteitä, joilla oli eri tiheys, oli vaikea vertailla. Keskimääräisesti, mitä suurempi oli näytteen tiheys, sitä korkeampi oli absorptiokerroin. Havu- ja lehtiliukosellun absorptiokertoimet olivat kuitenkin korkeita näytteiden alhaisista tiheyksistä huolimatta. Kuidun ominaisuuksien vaikutusta oli vaikea määritellä, koska ei tiedetty vaikuttiko absorptiokykyyn juuri mitattu ominaisuus vai jokin muu ominaisuus, jota ei otettu tutkimuksessa huomioon. Tutkimuksen tulosten mukaan kuidun pituudella ja leveydellä, kemiallisella koostumuksella ja ominaispinta-alalla ei ole suurta merkitystä sellulevyn kykyyn absorboida ääntä. Liukoselluilla oli korkeimmat absorptiokertoimet, vaikka niillä oli matalimmat tiheydet. Nostamalla tiheyttä nousee liukosellun absorptiokerroin lasivillan absorptiokerronta korkeammalle.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Puukuitu, äänen absorptio, akustiikka, vaahtorainaus, sellu			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Helsingin yliopiston kirjasto – Helda / E-thesis (opinnäytteet) ethesis.helsinki.fi			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

Tiedekunta/Osasto- Fakultet/Sektion – Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Laitos/Institution– Department Department of Forest sciences
Tekijä/Författare – Author Sara Mähönen		
Työn nimi / Arbetets titel – Title The effect of wood fibre ultrastructure on sound absorption		
Oppiaine /Läroämne – Subject Forest ecology and management		
Työn laji/Arbetets art – Level Master's thesis	Aika/Datum – Month and year February 2020	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages 51
<p>Tiivistelmä/Referat – Abstract</p> <p>Absorption panels are utilized in public spaces to improve the acoustic properties of the space and to reduce reverberation. Porous materials such as glass wool, mineral wool or polyester based batts are commonly used as sound absorption panels. However, they are generally harmful for environment and difficult to dispose. By foaming cellulose, water and soap, it is possible to form an environmentally friendly porous fiber material, which has the same sound absorption capacity as mineral wool. The purpose of this study is to investigate how the physical and chemical properties of the fiber affect the absorption capacity of the foam-formed pulp panel. The purpose is to find properties that increase the sound absorption capacity.</p> <p>The raw materials used in the study were hardwood and softwood kraft pulp from different bleaching stages and dissolving pulp. There were eight pulps with different properties. The softwood pulps were made of pine and the hardwood pulps were made of birch. The pulp was examined for fiber length and width, specific fiber surface area, chemical composition, pore size distribution and average pore diameter. A foam-forming technique was used to prepare the samples, in which the pulp was foamed with water and a surfactant. The foam was placed on a water-permeable metal mesh in a mold and dried. The result was a light and porous fibrous panel. Samples were cut from the panels and the sound absorption coefficient was measured using an impedance tube.</p> <p>The study noticed that the density of the sample had a significant effect on the absorption coefficient. Samples with different densities were difficult to compare. On average, the higher the sample density, the higher the sound absorption coefficient. However, the absorption coefficients dissolving pulps were high despite their low densities. The effects of the measured properties of fibers were difficult to determine because it was not known whether the absorption coefficient was affected by measured property or by another property that was not considered in this study. There were no significant differences in the absorption coefficients with the samples of the same density. According to the results of this study, fiber length and width, chemical composition and the surface area of fibers do not have significant effect on the ability of the cellulose panels to absorb sound. Dissolving pulp had the highest absorption coefficients and the lowest density. By increasing the density of dissolving pulp it's the absorption coefficient can be raised above the absorption coefficient of glass wool.</p>		
Avainsanat – Nyckelord – Keywords wood fiber, sound absorption, acoustics, pulp		
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited E-thesis, ethesis.helsinki.fi		
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information		

SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto.....	4
2 Puun rakenne ja käsittely.....	5
2.1 Kuidun hienorakenne.....	5
2.2 Kuidun mekaaniset ominaisuudet.....	8
2.3 Kuidun huokoisuus	9
2.4 Sellun valmistus	11
2.5 Liukosellu.....	14
3 Akustiikka ja ääniominaisuudet.....	16
3.1 Ääni ja akustiikka	16
3.2 Huokoiset materiaalit.....	17
3.3 Selluloosapohjaiset absorptiomateriaalit	19
4 Aineisto ja mittausmenetelmät	21
4.1 Aineisto	21
4.2 Näytteiden valmistus	23
4.3 Kuidun hienorakenteen mittaus.....	25
4.4 Äänen absorptio mittaus	26
5 Tulokset.....	27
5.1 Kuidun pituus ja leveys.....	27
5.2 Sellun kemiallinen koostumus	28
5.3 Huokoisuus ja ominaispinta-ala	28
5.4 Äänen absorptio.....	32
5.4.1 Kuidun pituuden ja leveyden vaikutus	32
5.4.2 Kuidun kemiallisen koostumuksen ja huokoisuuden vaikutus	35
6 Tulosten tarkastelu	37
6.1 Kuidun pituus ja leveys.....	37
6.2 Sellun kemiallinen koostumus	37
6.3 Pinta-ala ja huokoisuus	38
6.4 Äänen absorptio.....	39
7 Johtopäätökset.....	42
8 Lähteet.....	43
Liitteet	48

1 JOHDANTO

Toimiva akustiikka perustuu tilassa ääntä absorboivien eli sitovien, heijastavien ja hajottavien pintojen yhdistämiseen ja oikeaan sijoitteluun tilan mittasuhteiden ja geometrysten muotojen kanssa. Absorptiolevyinä käytetään yleensä huokoisia materiaaleja kuten lasivillaa, polyesterihuopaa tai mineraalivillaa. Ne ovat kuitenkin yleensä ympäristölle haitallisia ja vaikeasti hävitettäviä. On myös huomattu, että niiden käyttö voi olla ihmisille haitallista, esimerkiksi mineraalivilla voi aiheuttaa hengitystiesairauksia (Saracci ja Simonato 1982). Uusissa tutkimuksissa on keskitytty löytämään näille perinteisille materiaaleille korvaava aine, joka on ympäristöystävällinen, ihmiselle vaaraton, kevyt ja hinnaltaan edullinen (Pöhler ym. 2015; Mohd Nor ym. 2010; Koizumi ym. 2002). Absorptiomateriaaleina käytetään yleensä tiheydeltään alhaisia, huokoisia ja kevyitä materiaaleja. Matalien äänien absorbointi vaatii paksun levyn, jolloin myös levyn paino yleensä nousee. Huokoisista materiaaleista saadaan aikaan paksuja, mutta kevyitä absorptiolevyjä, joiden hyvä äänen absorptiokyky johtuu korkeasta ominaisvirtausvastuksesta ja monimutkaisista huokosista, joiden läpi ääniaalto mutkittelee.

Sellupohjaisia absorptiomateriaaleja tutkitaan ja niistä kehitetään uutta absorptiolevyä. Pöhlerin ym. (2015) tutkimuksessa havaittiin, että vaahtorainatulla havusellulevyllä on melko samanlaiset absorptio-ominaisuudet kuin perinteisillä absorptiomateriaaleilla. Vaahtorainaus on sellulevyn valmistusmenetelmä, jossa vaahdotetaan seosta, jossa on yleensä noin 99 prosenttia vettä ja 1 prosentti kuituja sekä vaahdotusainetta. Kuivattuna seoksesta syntyy huokoinen sellulevy, jolla on matala tiheys. Sellupohjaisten levyjen vahvuuksia ovat raaka-aineen helppo saatavuus, keveys ja myrkyttömyys.

Varsinkin lisääntyvää puurakentamista markkinoidaan ekologisena ja kestävän kehityksen ratkaisuna rakennusteollisuudessa. Äänieristeenä käytetään kuitenkin usein mineraalivillaa, jota on vaikea hävittää, joten se päättyy lopulta kaatopaikalle. Korvaavalla suomalaisella sellupohjaisella äänieristeellä ja absorptiomateriaalilla voisi siis olla kysyntää markkinoilla. Suomalaiselle metsäteollisuudelle se saattaisi olla uusi kansainvälinen aluevaltaus.

Tässä työssä tutkitaan havu- ja lehtipuusellujen kuitujen hienorakenteen ominaisuuksia ja niiden vaikutusta sellulevyn absorptiokykyyn. Tutkittavia ominaisuuksia ovat kuidun

pituus ja leveys, kuidun pinta-ala, huokoskoko ja kuidun kemiallinen koostumus. Havukuitu edustaa pitkäkuituista sellua ja lehtikuitu lyhytkuituista sellua. Sellun valmistusprosessin eri vaiheista olevilla selluilla on erilainen kemiallinen koostumus ja kuidun pinta-ala. Kaikilla tutkimuksissa käytetyillä sellukuiduilla on siis hieman toisistaan poikkeavat ominaisuudet. Vertaamalla vaahtorainattujen sellulevyjen absorptiokertoimia ja sellukuitujen ominaisuuksia etsitään yhteyksiä niiden välillä. Tämän tutkimuksen tutkimuskysymys kuuluu:

- Vaikuttaako kuidun hienorakenne vaahtorainatun sellulevyn absorptiokertoimeen ja miten?

Hypoteeseja ovat:

H₁: Lyhytkuituiset sellulevyt absorboivat ääntä paremmin kuin pitkäkuituiset.

H₂: Kuitujen ligniini- ja hemiselluloosapitoisuuden pienentyessä ja ominaispinta-alan kasvaessa sellulevyn absorptiokerroin nousee.

2 PUUN RAKENNE JA KÄSITTELY

2.1 Kuidun hienorakenne

Havupuun, kuten männyn ja kuusen, solut ovat pääosin pitkittäissuuntaisia trakeideja (Jensen 1977). Lehtipuiden, kuten koivun ja haavan, rakenne on monimutkaisempi, sillä pitkittäisiä solutyyppejä ovat trakeidit, putkilosolut ja tylppysolut (Jensen 1977). Havupuilla kuidun pituus vaihtelee 1,4–6,0 mm välillä ja leveys 20–50 µm välillä (Alén 2000a). Lehtipuilla kuidun pituus on 0,4–1,6 mm ja leveys 10–40 µm (Alén 2000a). Havupuissa voidaan erottaa vuosilustot, jotka muodostuvat kevät- ja kesäpuun vuorottelusta (Jensen 1977). Kesäpuun solut ovat pienempiä ja kesäpuu erottuu tummana värinä vuosilustossa. Lehtipuilla kevät- ja kesäpuun voi erottaa vain kehäputkiloisilla, joilla kevätpuun erottaa suurista kehämuodostelmassa olevista putkiloista (Jensen 1977). Suurin osa puun solukosta muodostuu pitkittäisistä kuolleista kuiduista.

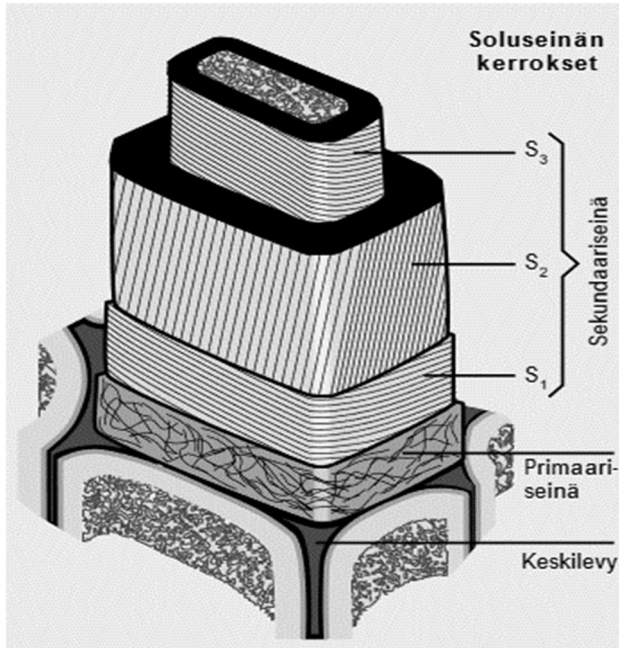
Soluseinä koostuu selluloosasta, hemiselluloosasta ja ligniinistä. Puukuituteollisuudessa puun käytetyin osa, selluloosa, on lineaarinen luonnonpolymeeri, joka koostuu glukoosi-anhydridiyksiköistä ($C_6H_{10}O_5$), jotka ovat liittyneet toisiinsa β -glykosidisilla 1-4 sidoksilla (Panshin ja Zeeuw 1970). Alkeisfibrilli on puukuidun pienin rakenneyksikkö, joka on muodostunut useista samansuuntaisista molekyyliketjuista, jotka ovat kiinnittyneet toisiinsa vetysidoksin (Wikberg ym. 2003). Alkeisfibrillissä on täysin järjestäytyneitä kiteisiä alueita ja järjestäytymättömiä amorfisia alueita (Wikberg ym. 2003). Selluloosakuidut rakentuvat pitkittäisistä mikrofibrilleistä (Wikberg ym. 2003). Mikrofibrillit muodostuvat alkeisfibrilleistä, jotka koostuvat 6x6 selluloosa polymeereistä (Moon ym. 2011).

Hemiselluloosat ovat haaroittuneita heteropolymeereja, joiden osia voivat olla esimerkiksi ksyloosi, arabinoosi, mannoosi, galakturonihappo tai fukoosi (Alén 2000a). Hemiselluloosat ovat amorfisia ja liukenevat veteen tai emäkseen (Alén 2000a). Liukosellun valmistuksessa hyödynnetään hemiselluloosan kykyä hydrolysoitua happoon selluloosaa helpommin (Sixta 2006). Havupuiden hemiselluloosat eroavat lehtipuiden hemiselluloosista ja pitoisuudet vaihtelevat puulajien välillä. Havupuissa hemiselluloosat ovat yleensä galaktoglukomannaaneja ja arabinoglukuronoksylaaneja ja lehtipuissa puolestaan glukuronoksylaaneja ja glukomannaaneja (Alén 2000a).

Ligniini on soluseinän kolmas päärakennusosa ja se toimii liimana välilamellissa sitoen kuidut toisiinsa (Alén 2000a). Ligniinit ovat erilaisia aromaattisia polyfenoleja, joiden perusrunkona toimii fenyylipropaani (Alén 2000a). Eri puulajeilla esiintyy kolmea erilaista ligniinin monomeeria: p-kumaryylialkoholia, koniferyylialkoholia ja sinapyylialkoholia (Jääskeläinen ja Sundqvist 2007). Ligniinit ovat amorfisia ja kiinnittyneet toisiinsa epäsäännöllisesti, eivätkä ne muodosta selkeitä rakenteita, kuten selluloosa (Alén 2000a). Ligniinin määrä ja rakenne vaihtelevat eri puulajien välillä. Ligniini on hydrofobinen ja säätelee soluseinän vesipitoisuutta hemiselluloosan kanssa (Alén 2000a). Ligniini muodostaa myös sidoksia hemiselluloosan kanssa jäykistäen soluseinän rakennetta (Alén 2000a).

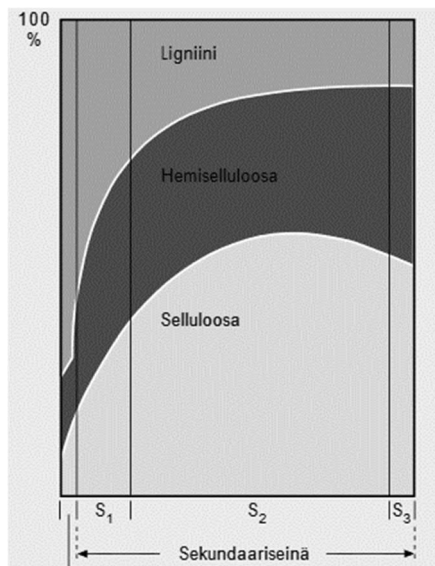
Havupuissa on yleensä vähemmän hemiselluloosaa ja enemmän ligniiniä kuin lehtipuissa (Jensen 1977). Muiden aineiden, joista suurin osa on uuteaineita, osuus on yleensä alle viisi prosenttia (Alén 2000a). Uuteaineita ovat esimerkiksi terpeenit, fenoliset yhdisteet, resiinit ja rasvahapot (Jensen 1977).

Lehtipuiden kuidun ja havupuiden trakeidien solurakenne jaotellaan neljään osaan: välilamelliin, primääriseinään, sekundääriseinään ja soluonteloon (Kuva 1) (Panshin ja Zeeuw 1970). Sekundääriseinä jaetaan vielä ominaisuuksiltaan kolmeen kerrokseen: ulkokerrokseen S_1 , keskikerrokseen S_2 ja sisäkerrokseen S_3 (Panshin ja Zeeuw 1970).



Kuva 1. Soluseinän rakenne (Saranpää 1977).

Välilamelli ympäröi soluseinää ja on yhteydessä viereisiin soluihin. Se on amorfista ainetta, joka koostuu pääasiassa ligniinistä ja pektiinistä (Jensen 1977). Primääriseinä on varsinaisen soluseinän uloin osa. Siinä selluloosan mikrofibrillit ovat vain osittain orientoituneet ja suurin osa niistä muodostaa säännöttömän verkon (Alén 2000a). Sekundääriseinän ulkokerros S_1 muodostuu lamelleista, joiden mikrofibrillikulmat vaihtelevat 50–70° välillä (Panshin ja Zeeuw 1970). Paksuin S_2 kerros on kuidun lujuusominaisuuksien kannalta merkittävin ja kun puhutaan kuidun mikrofibrillikulmasta, tarkoitetaan sillä juuri keskikerroksen S_2 mikrofibrillikulmaa (Kärkkäinen 2003). Siinä mikrofibrillit ovat suuntautuneet oikeakierteisesti pituusakseliin nähden yleensä noin 10–30 ° kulmassa (Panshin ja Zeeuw 1970). Kuten kuvasta 2 nähdään, suurin osa soluseinän selluloosasta löytyy S_2 kerroksesta. S_3 kerros on ohut ja sen lamellien mikrofibrillikulma vaihtelee yleensä 50–90 ° välillä (Panshin ja Zeeuw 1970).



Kuva 2. Havupuun sekundaariseinän kemiallinen koostumus (Saranpää 1977).

2.2 Kuidun mekaaniset ominaisuudet

Puukuitujen mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttavat pääasiassa mikrofibrillikulma, soluseinän kemiallinen koostumus ja selluloosan kiteisyysaste (Kärkkäinen 2003). Kuitujen ominaisuudet vaihtelevat paljon myös saman puun sisällä, sillä yksittäisen kuidun ominaisuuksiin ja hienorakenteeseen vaikuttavat puun ikä, kasvuympäristö, kuidun sijainti puussa (pinta-, sydän- tai nuorpuu) sekä kevät- ja kesäpuun eroavaisuudet (Jääskeläinen ja Sundquist 2007). Kuitujen lujuutta vertailtaessa mitataan usein kuitujen vetolujuus ja kimmokerroin. Vetolujuus määritellään kappaleen kykynä vastustaa vastakkaisiin suuntiin vetävää voimaa, joka mitataan yleensä syiden suuntaisesti (Kärkkäinen 2003). Kun voima on suurempi kuin kappaleen vetolujuus, kappale murtuu. Kimmokerroin kertoo, kuinka paljon kappale taipuu tietyn voiman kohdatessaan, ennen kuin se murtuu (Kärkkäinen 2003). Mitä suurempi on kimmokerroin, sitä vähemmän kappale taipuu, eli kappaleen jäykkyys kasvaa kimmokertoimen kasvaessa (Jääskeläinen ja Sundquist 2007). Kuitujen lujuusominaisuudet ovat erilaiset mitattaessa syiden, säteen ja tangentin suuntaan (Kärkkäinen 2003). Yleensä vetolujuus ja kimmokerroin mitataan syiden suuntaisesti.

Havupuilla mikrofibrillikulma kasvaa pinnasta ytimeen päin, eli lähellä ydintä mikrofibrillikulma on suurin, samalla kuidun pituuden ollessa lyhin (Panshin ja Zeeuw 1970). Mikrofibrillikulma on erilainen eri puulajeilla. Havupuilla se on yleensä suurempi kuin

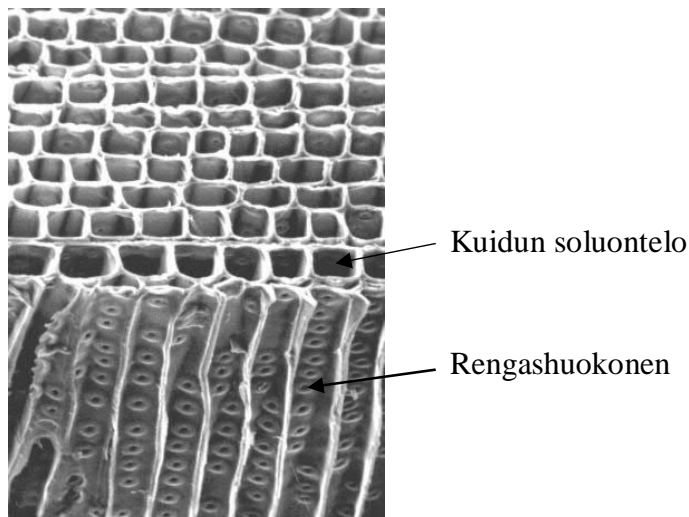
lehtipuilla (Panshin ja Zeeuw 1970). Lehtipuilla kuidun pituus vaihtelee puun sisällä vähemmän, kuten myös fibrillikulma (Panshin ja Zeeuw 1970). Kevät- ja kesäpuukuitujen mekaaniset ominaisuudet eroavat toisistaan muun muassa eri suuruisten mikrofibrillikulmien takia. Kevätpuu on heikompaa suuremman mikrofibrillikulman vuoksi (Kennedy ja Ifju 1962). Fuotón (1969) mukaan kuusen kesäpuun vetolujuus on nelinkertainen kevätpuuhun verrattuna. Kesäpuussa myös selluloosapitoisuus ja selluloosan kiteisyysaste ovat suurempia ja ligniinipitoisuus on pienempi kuin kevätpuussa (Xi 2018). Pagen ym. (1972) mukaan kuiduilla, joilla on sama mikrofibrillikulma, on samanlaiset mekaaniset ominaisuudet riippumatta siitä, onko kuitu kevät- vai kesäpuuta.

Keittäminen ja valkaisu muuttavat kuidun ominaisuuksia ja kemiallista koostumusta. Sixtan (2006) mukaan kuidun selluloosapitoisuus vaikuttaa merkittävästi sen mekaanisiin ominaisuuksiin. Sellukuidun mekaaniset ominaisuudet ovat yleensä lähellä käsittelemättömän puukuidun tasoa, jos selluloosa ei hajoa merkittävästi valmistusprosessin aikana. Voimakas keittäminen tai valkaisu saattavat kuitenkin aiheuttaa selluloosan hajoamista, mikä vaikuttaa kuidun lujuuteen ja jäykkyyteen heikentävästi (Alén 2000b).

Kun ääniaallot kulkevat kuitujen läpi, aiheuttavat ne värinää kuiduissa (Beranek ja Istvan 1992). Kuidun mekaaniset ominaisuudet vaikuttavat siihen, miten paljon se värähtelee ääniaaltojen ja soluseinän välisen kitkan voimasta. Yksittäisten kuitujen mekaanisten ominaisuuksien vaikutusta materiaalin äänen absorptiokykyyn ei ole vielä tutkittu.

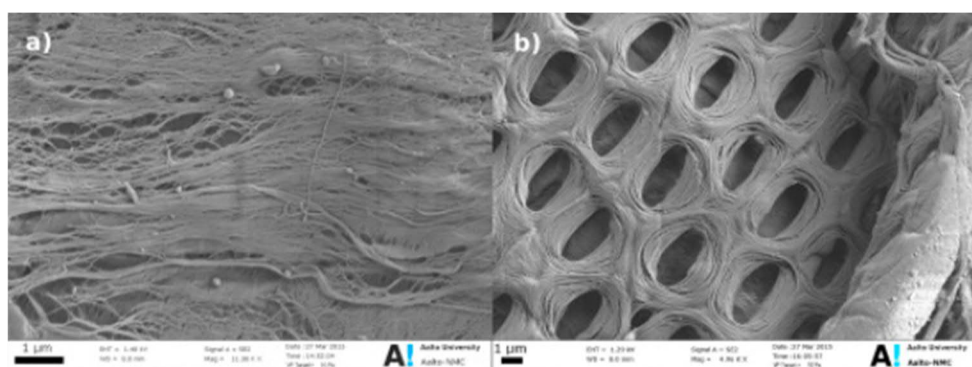
2.3 Kuidun huokoisuus

Huokoisella materiaalilla tarkoitetaan tiheydeltään alhaista materiaalia, jossa on huokosia eli aukkoja, joiden läpi ilma tai vesi pääsee kulkemaan (Liu ja Chen 2014). Huokoiset materiaalit koostuvat tyypillisesti kiinteästä matriisista ja ilman täyttämistä huokosista (Choe ym. 2017). Huokokset voivat olla avoimia tai suljettuja (Choe ym. 2017). Avoimet huokokset absorboivat ääntä paremmin, sillä ne ovat yhteydessä toisiinsa ja hajottavat ääntä epäsäännöllisen rakenteensa vuoksi (Bismarck ym. 2002). Materiaalit voidaan jaotella niiden huokosten koon mukaan makrohuokosiin (halkaisija $\varnothing > 50$ nm), meso-huokosiin ($2 \text{ nm} < \varnothing < 50 \text{ nm}$) ja mikrohuokosiin ($\varnothing > 2 \text{ nm}$) materiaaleihin (Thommes ym. 2015).



Kuva 3. Havukuitujen seinämissä olevia rengashuokosia, joiden kautta ääniaallot pääsevät kuidun sisälle onttoihin soluonteloihin (Mukaillen: Buschow ym. 2001).

Kuitumaiset huokoiset materiaalit voivat koostua luonnollisista tai synteettistä kuiduista, jotka muodostavat toisiinsa yhteydessä olevan monimutkaisen verkoston, jonka läpi ääniaallot kulkevat. Akustiikan kannalta huokosiksi lasketaan kuitujen väliin jäävä tyhjä tila, jota pitkin ääniaalto voi edetä. Puukuiduissa huokaisuuden muodostavat trakeidien soluontelot, havupuiden pihkatiehyet ja rengashuokokset (Kuva 3) sekä lehtipuiden putki-
lot (Kuva 4) (Sixta 2006). Noin puolet kuitujen ontoista soluonteloista on ilman täyttämiä (Wassilieff 1996). Ääniaallot pääsevät niihin rengashuokosten tai rikkoutuneiden soluonteloiden päiden kautta, mikä lisää ääniaallon kulkeman matkan pituutta ja kiemuraisuutta, jotka aiheuttavat ääniaaltojen häviötä (Wassilieff 1996). Pieniä huokosia syntyy myös sellun keitossa ligniinin ja hemiselluloosan poistuessa soluseinästä (Stone ja Scallan 1965) (Maloney ja Paulapuro 1999). Puukuidussa huokoseksi määritellään soluseinämän aukko, johon mahtuu vesimolekyyli (Maloney 2000).



Kuva 4. Mikroskooppikuva lehtipuusellun kuiduista a) Pitkittäiset kuidut tangentin suunnasta; b) Poikkileikkaus lehtipuun putkilosoluista (Lovikka ym. 2016).

Suurin osa puukuidun huokosista on mesohuokosia (Kimura ym. 2013). Sellun keitossa syntyy uusia mesohuokosia ligniinin ja hemiselluloosan poistuessa soluseinämatriisista, kun taas kuivaaminen aiheuttaa mesohuokosten luhistumista (Lovikka ym. 2016). Kimuran ym. (2013) tutkimuksissa ligniinin poistaminen ei kuitenkaan merkittävästi kasvattanut mesohuokosten määrää. He esittävätkin ajatuksen, jossa xylaani-niminen soluseinän hemiselluloosa leviää ja täyttää mesohuokokset ligniinin poistuessa soluseinästä.

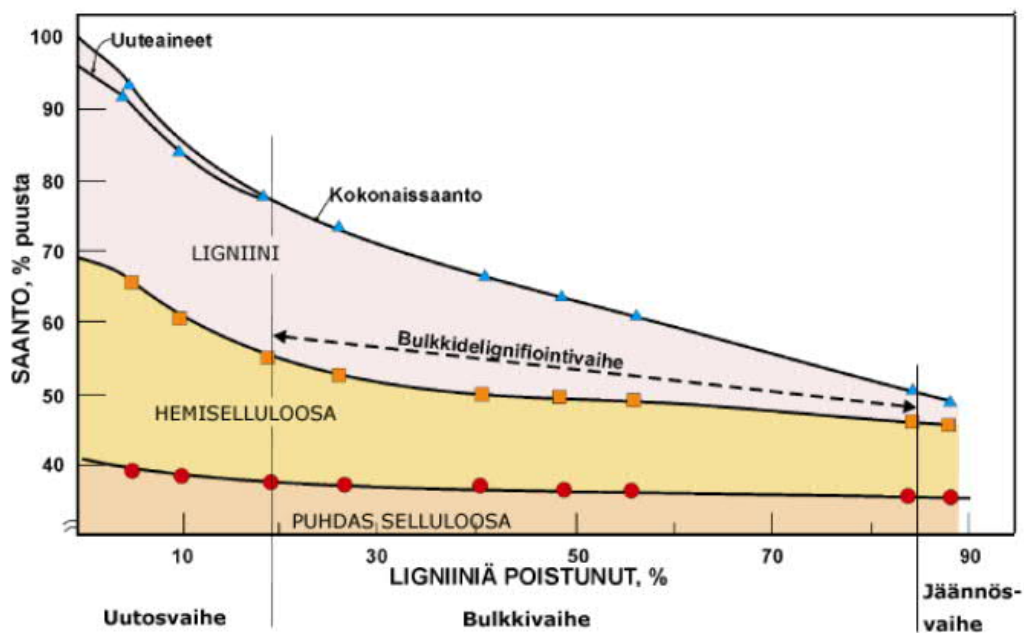
Huokoisuuden lisääntyessä kasvaa myös kuidun ominaispinta-ala. Huokoisuutta mitattaessa huokosten oletetaan olevan lieriön muotoisia, mutta tarkempien mikroskooppikuvien mukaan puukuidun huokokset ovat lähempänä ellipsin muotoa (Weatherlax ym. 1997). Lovikan ym. (2016) tutkimuksissa kuivaamattoman havusellun ominaispinta-ala ja huokosten keskihalkaisija ($282 \text{ m}^2/\text{g}$; $7,9 \text{ nm}$) olivat suurempia kuin vastaavan lehtipuusellun ($225 \text{ m}^2/\text{g}$; $7,6 \text{ nm}$). Tutkimuksessa kuivaaminen pienensi ominaispinta-alaa hornifikaation myötä sitä enemmän, mitä rajumpaa kuivaustekniikkaa käytettiin. Liukosellun ominaispinta-alan oletettiin olevan suurempi kuin sulfaattisellun, sillä liukosellun kuiduista oli liuotettu pois melkein kaikki ligniini ja hemiselluloosa, mikä luo soluseinään uusia huokosia. Lovikan ym. (2016) tuloksissa kuivaamattoman lehtiliukosellun ominaispinta-ala ja huokosten keskihalkaisija ($199 \text{ m}^2/\text{g}$; $7,1 \text{ nm}$) olivat kuitenkin pienempiä kuin vastaavan sulfaattisellun. Tämä johtuu osaksi siitä, että liukosellussa esiintyy enemmän hornifikaatiota ja voimakas valmistusprosessi voi muuttaa soluseinän kemiallisia sidoksia (Lovikka ym. 2016).

2.4 Sellun valmistus

Sulfaattikeitto on yleisin menetelmä valmistaa sellua, sillä sen avulla voidaan tuottaa lujempaa massaa kuin sulfiittimenetelmällä ja se soveltuu niin havu- kuin lehtipuille (Sixta 2006). Sellun valmistuksessa puuhaketta keitetään, jotta kuituja toisiinsa kiinni pitävä ligniini saadaan poistettua kemikaalien ja lämmön avulla (Alén 2000b). Tarkoitus on poistaa mahdollisimman paljon ligniiniä hajottamatta selluloosaa. Liian raju ligniinin poisto keittovaiheessa hajottaa selluloosaa huonontaan massan lujuutta ja saantoa (Alén 2000b). Sulfaattikeitossa, joka kattaa 89 % kaikesta kemiallisesta sellun valmistuksesta, keittokemikaalina toimii valkolipeä, joka on natriumhydroksidin (NaOH) ja natriumsul-

fidin (Na_2S) seos (Sixta 2006). Osa ligniinistä jää kuitenkin keitettyyn kuitumassaan aiheuttaen massalle keltaisen värin. Kappaluku kuvaa kuiduissa olevaa ligniinin määrää asteikolla 1–100. Keittämällä pyritään havusellulla kappalukuun 25–30 ja lehtipuusellulla 15–20 (Sixta 2006). Kaikkea ligniiniä ei saada poistettua keittämällä ilman, että osa selluloosasta hajoaa, jolloin myös saanto laskee. Lopullinen ligniinin poisto tapahtuu valkaisussa (Alén 2000b).

Keittämisen aikana tapahtuu useita reaktioita, jotka vaikuttavat ligniinin kemialliseen rakenteeseen. Muutokset lisäävät ligniinin liukenemista emäksiseen keittoliuokseen. Keittoliuoksessa vetysulfidi-ionit (HS^-) reagoivat ligniinin kanssa ja vapauttavat sitä soluseinästä (Alén 2000b). Pääasiassa ligniinin moolimassa pienenee, kun α - ja β -aryylieetterisidokset katkeavat (Alén 2000b). Vetysulfidi-ionit irrottavat myös metyyliiryhmiä ligniinin rakenteesta. Näiden reaktioiden vuoksi syntyy uusia fenolisia yhdisteitä, jotka kasvattavat ligniinin vesiliukoisuutta. Keitto ei ole selektiivinen, sillä vain osa ligniinistä reagoi. Moolimassan pieneneminen ja hydrofiilisyyden kasvu edesauttavat ligniinin liukenemista keittoliuokseen, laskien näin sellun kappalukua (Alén 2000b). Ligniinin liukeneminen voidaan jakaa kolmeen eri vaiheeseen (Kuva 5), jotka ovat uutospaihe, bulkkidelignifointi vaihe ja jäännösvaihe (Jensen 1977). Eniten ligniiniä liukenee bulkkidelignifointi vaiheessa sekundaäriseinästä.



Kuva 5. Kuidun kemiallisen koostumuksen muutos sellun keiton aikana (Know pulp 5.0).

Keittämisen jälkeen massa lajitellaan ja pestään. Karkeassa lajittelussa massasta poistetaan kuituuntumattomat hakkeet ja oksat sekä muut epäpuhtaudet (Alén 2000b). Tämän jälkeen massa pestään pesupuristimessa, jolloin massasta poistetaan siihen jäänyt keittoliemi ja liuennut puuaine. Hienolajittelussa massasta poistetaan tikut ja loput epäpuhtaudet (Alén 2000b). Hienolajittelun jälkeen massa pestään vielä kerran, ettei siihen jää kemikaaleja häiritsemään valkaisua.

Happivalkaisussa hyödynnetään happea ja alkalia ligniinin ja muiden orgaanisten aineiden poistamiseen. Alkalina toimii valkolipeä tai hapetettu valkolipeä (Alén 2000b). Happivalkaisussa ligniini pyritään hapettamaan ja muuttamaan sellaiseen muotoon, jossa se liukenee alkaliin. Ligniinin fenolihydroksyyli-ryhmät ionisoituvat alkalin kanssa, jolloin ne tarjoavat vapaita elektroneja, jotka reagoivat hapen kanssa (Sixta 2006). Hapettuessaan ligniinin rakenne alkaa hajota, jolloin sen osat liukenevat helpommin valkaisuliuokseen (Alén 2000b). Mitä enemmän ligniiniä saadaan poistettu happivaiheessa, sitä vähemmän tarvitaan seuraavan vaiheen kalliita ja ympäristölle haitallisia valkaisukemikaaleja. Happivaiheessa ligniiniä voidaan poistaa massasta noin 40–50 % (Sixta 2006). Happivalkaisun jälkeen havusellun kappaluku on 8,5–22 ja lehtipuusellun 13,5–17,5 (Sixta 2006).

Happivaiheessa osa selluloosasta hajoaa ketjun päistä tai satunnaisesta kohdasta. Happivalkaisun siirtymävaiheessa metallit, kuten rauta ja kupari, hajottavat peroksiedeja, joista muodostuu hydroksyyli-radikaaleja, jotka katkaisevat selluloosapolymeerien ketjuja satunnaisista kohdista (Gullichsen & Paulapuro 2000). Metallien haitallisia reaktioita pyritään estämään lisäämällä massaan magnesiumsulfaattia (MgSO_4) (Gullichsen & Paulapuro 2000).

Valkaisussa määritellään lopullinen massan vaaleus poistamalla jäännösligniini (Sixta 2006). Samalla pyritään siihen, että massa säilyttää vaaleutensa hyvin. Valkaisu on monivaiheista, koska erilaiset valkaisukemikaalit reagoivat eri funktionaalisten ryhmien kanssa (Alén 2000b). Tarpeeksi vaaleaa lopputulosta ei saada aikaan vain yhdellä valkaisukemikaalilla ilman, että massan laatu huononee. Valkaisun eri vaiheissa käytetään klooridioksidia, vetyperoksidia, happea ja natriumhydroksidia (Sixta 2006). Valkaisu perustuu lähinnä ligniinin aromaattisen renkaan hapettumiseen ja vapaiden fenoliryhmien reaktioihin. Vetyperoksidi reagoi hydroksidi-ionin kanssa muodostaen perhydroksyyli-ionin, joka hapettaa värillisiä ligniinin kromofori-yhdisteitä värittömiksi (Isotalo 1990). Jo-

kaisen valkaisukemikaalin käytön jälkeen sellu pestään, jotta reagoinut ligniini ja ylimääräiset kemikaalit saadaan huuhdeltua. Valkaisun jälkeen lopullinen kappaluku on yleensä noin 0,5 (Sixta 2006) eli alle 5 %.

Sellun lopullinen kemiallinen koostumus eroaa puuaineksen kemiallisesta koostumuksesta niin, että yli puolet hemiselluloosta ja melkein kaikki ligniini on liuotettu pois kuiduista (Taulukko 1). Myös suurin osa uuteaineista on liuonnut sellun valmistusprosessin aikana. Selluloosan määrä laskee vain hieman.

Taulukko 1. Puuaineen ja sellun kemialliset koostumukset. (Mukaillen: Jensen 1977)

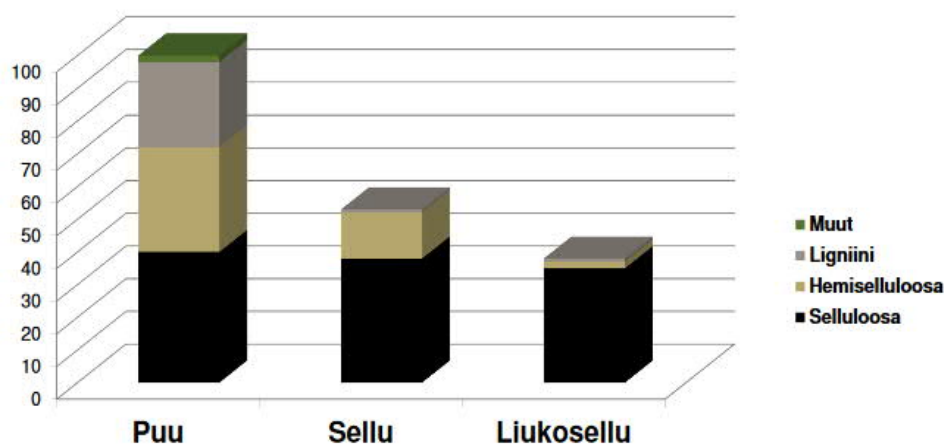
	Mänty	Mäntysellu	Koivu	Koivusellu
Selluloosa	39	35	40	34
Hemiselluloosa	30	9	37	17
Ligniini	27	3	20	2
Uuteaineet	4	<0,5	3	<0,5
Ainesta yht./saanto	100	47	100	53

Lopuksi sellu kuivataan viiralla puristuksen ja imun avulla. Puristusosan jälkeen sellu kuivatetaan kuivatuskaapissa niin, että kuiva-ainepitoisuus on noin 90 % (Alén 2000b). Lopuksi arkit leikataan ja pakataan. Kuivaaminen vaikuttaa merkittävästi kuidun rakenteeseen ja ominaisuuksiin. Altistuessaan kosteudelle kuidut eivät kykene sitomaan yhtä paljon vettä kuin ennen kuivaamista. Ilmiötä kutsutaan hystereesiksi (Kärkkäinen 2006). Se johtuu hornifikaatiosta eli sarveistumisesta (Laivins ja Scallan 1993). Hornifikaatio johtuu kuitujen kuivaamisesta, jolloin kuidun huokokset romahtavat osittain tai kokonaan. Tällöin vierekkäiset solut muodostavat toistensa välille vetysidoksia, jotka estävät huokosia täyttymästä vedellä uudestaan (Laivins ja Scallan 1993). Kuidut, joissa on tapahtunut hornifikaatiota kutistuvat ja turpoavat veden vaikutuksesta vähemmän kuin kuivaamattomat kuidut. Kuitujen voidaan sanoa tällöin olevan stabiileja.

2.5 Liukosellu

Liukosellu on sellulaji, jolla on korkea kemiallinen ja fysikaalinen puhtaus sekä vaaleus. Se eroaa tavallisesta sellusta niin, että siitä on poistettu melkein kaikki hemiselluloosa (Sixta 2006). Sen englanninkielinen nimitys *dissolving pulp* tulee juuri hemiselluloosan

pois liuottamisesta. Liukosellun selluloosapitoisuus on yli 90 % (Kuva 6), kun tavallisella sulfaattisellulla se vaihtelee 60–90 % välillä (Jensen 1977). Liukosellua käytetään pääasiassa puupohjaisten kankaiden, kuten viskoosin, lyocellin ja Ioncell-kuitujen valmistamiseen sekä selluloosajohdannaisten kuten sellofaanin raaka-aineena.



Kuva 6. Koivun kemialliset komponentit puuaineessa sekä sulfaatti- ja liukosellussa (Välimaa 2014).

Liukosellua voidaan valmistaa sulfiittimenetelmällä tai enemmän käytetyllä esihydrolyysi-sulfaattimenetelmällä. Jälkimmäisessä osa hemiselluloosasta liuotetaan pois hydrolyysin avulla 140–170 asteessa ennen keittoprosessia (Sixta 2006). Hydrolyysissa vesihöyry vapauttaa puusta happojen protoneja, jotka laskevat prosessin pH-arvoa, jolloin helposti hydrolysoituvat hemiselluloosat liukenevat soluseinästä (Jensen 1977). Samalla myös osa ligniinistä liukenee. Lämpötilasta ja ajasta riippuen kuitujen hemiselluloosasta saadaan liuotettua 5–20 % (Sixta 2006). Liian pitkä tai voimakas esihydrolyysi alkaa kuitenkin hajottaa selluloosaa huonontaan näin massan saantoa (Jensen 1977). Esihydrolyysin jälkeen sellu keitetään kuten tavallinen sulfaattimassa. Keittäminen ja valkaisu vaativat kuitenkin voimakkaammat prosessit, jotta massa saavuttaa korkean vaaleuden (Jensen ym. 1977). Korkea vaaleus saavutetaan, kun ligniinin osuus on vain noin 0,05 % eli kapaluku on noin 0,2–0,5 (Berzings ja Tasman 1957). Korkea puhtaus on tärkeää, sillä vähäinenkin määrä epäpuhtauksia tai epäorgaanisia aineita, saattavat vaikeuttaa lopputuotteiden valmistusprosesseja. Valkaistu liukosellu pestään ja kuivataan lopuksi. Tavallisessa sulfaattikeitossa saanto on noin 45–55 %, kun taas liukosellussa se on vain 35–40 % (Alén 2000b). Tämä johtuu siitä, kun halutaan poistaa mahdollisimman paljon hemiselluloosaa ja ligniiniä, hajoaa samalla myös osa selluloosasta.

3 AKUSTIIKKA JA ÄÄNIOMINAISUUDET

3.1 Ääni ja akustiikka

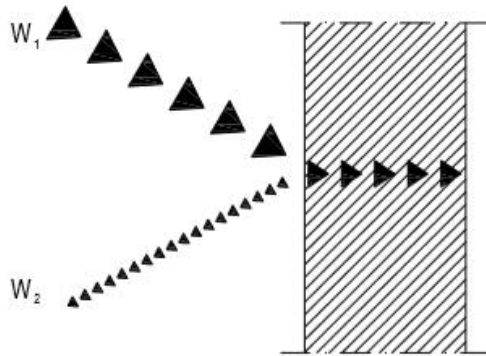
Fysiikassa ääni määritellään ilmanpaineen vaihteluna staattiseen ilmanpaineeseen nähden eli ääni on ilman tihentymiä ja harventumia (Kylliäinen 2006). Ääni etenee ilmassa pitkittäisaaltona ilmahiukkasten liikkeenä. Kuuloaistimus syntyy, kun korvan rumpukalvo alkaa värähdellä ilmanpaineen vaihtelun takia. Kun värähtely on tiheää, ääni on korkea ja värähtelyn ollessa harvaa, ääni on matala (Kylliäinen 2006). Ihminen aistii äänenä ilmanpaineen vaihtelun, jonka taajuus on noin 20 Hz ja 20 000 Hz välillä (Kylliäinen 2006). Hertsi (Hz) kuvaa taajuutta äänen värähtelynä per sekunti. Ääni etenee aina väliaineessa kuten ilmassa, nesteessä tai kiinteässä aineessa. Huoneenlämmössä äänen nopeus on ilmassa noin 340–345 m/s (Kylliäinen 2006). Kun ilmassa kulkeva ääniaalto törmää kiinteään aineeseen, alkaa kiinteä aine värähdellä. Tällöin ääni etenee kiinteässä aineessa tai vutusaaltolina. Äänenpainetasoa eli äänen voimakkuutta kuvaa desibeli (dB). Äänenpaine on hetkellinen ilmanpaineen muutos staattisen paineen suhteen (Kylliäinen 2006).

Akustiikka on tieteenala, joka tutkii ääntä, sen etenemistä ja ominaisuuksia. Huoneakustikassa pyritään kontrolloimaan äänen kulkua, heijastumista ja vaimenemista huoneessa (Kylliäinen 2006). Rakennusten huoneakustiikka on tärkeää varsinkin yleisissä tiloissa, joissa on tarkoituksena luoda hyvät olosuhteet erilaisille puhe- ja musiikkiesityksille. Ääntä heijastavilla pinnoilla suunnataan ääntä yleisöä kohti ja vaimentavilla pinnoilla hallitaan kaiuntaa ja siten puheen selkeyttä (Kylliäinen 2006).

Absorptiossa ääniaalto törmää esteeseen ja se kimpoaa heikompana esteestä takaisinpäin. Osa ääniaallosta imeytyy esteen rakenteeseen saaden rakenteen hiukkaset värähtelemään. Heijastumatta jäänyt ääniteho on siis absorboitunut (Kylliäinen 2006). Materiaalin kykyä absorboida äänitehoa kuvaa absorptiosuhde α (Kuva 7), joka on materiaalin pinnasta heijastumatta jääneen äänitehon $W_1 - W_2$ ja pinnan kohdanneen äänitehon W_1 suhde (Kylliäinen 2006):

$$\alpha = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \quad (1)$$

Absorptiosuhde eli absorptiokerroin α on positiivinen luku, jonka arvo vaihtelee 1–0 välillä. Absorptiosuhteen ollessa 0 äänitehotaso ei alene lainkaan, vaan heijastus on täydellinen (Kylliäinen 2006). Kunkin materiaalin absorptiosuhteen arvo ei ole vakio, vaan se riippuu taajuudesta. Materiaalien absorptiokertoimet mitataan yleensä oktaavikaistoittain 125–4000 Hz keskitäajuuksilla (Kylliäinen 2006).



Kuva 7. Osa äänestä heijastuu takaisin ja osa imeytyy esteen materiaalin (Kylliäinen 2006).

Materiaalia, joka absorboi ääntä kutsutaan absorbentiksi (Kylliäinen 2006). Ääniaallot vaimenevat, kun ne kulkevat absorbentin läpi. Tämä johtuu pääosin suurilla taajuuksilla ääniaaltojen ja huokosten seinien välillä syntyvästä kitkasta (Beranek ja Istvan 1992). Myös ääniaaltojen laajentuminen, supistuminen ja suunnanmuutokset epäsäännöllisten huokosten läpi aiheuttavat niiden häviötä (Beranek ja Istvan 1992). Lyhyillä taajuuksilla ääniaallot vaimenevat, kun ilma supistuu ja laajenee kuitujen sisällä muuttaen samalla lämpötilaa (Beranek ja Istvan 1992).

3.2 Huokoiset materiaalit

Paljon käytettyjä huokoisia äänen absorptiomateriaaleja rakennuksissa ovat esimerkiksi mineraalivilla, lasivilla, erilaiset ruiskutteet ja tekstiilit. Niiden hyvä äänen absorptiokyky perustuu sille, että ääniaallon äänienergia muuttuu huokoisen materiaalin kohdatessa lähinnä lämpöenergiaksi (Kylliäinen 2006). Materiaalin paksuus on yksi tärkeimmistä huokoisen materiaalin äänen absorptioon vaikuttavista ominaisuuksista (Jahangiri ym. 2016). Yleensä mitä paksumpi materiaali, sitä korkeampi absorptiokerroin matalilla taajuuksilla

(Kylliäinen 2006). Huokoinen materiaali absorboi parhaiten sellaisia taajuuksia, joiden aallonpituus on nelinkertainen materiaalin paksuuteen verrattuna (Kylliäinen 2006). Tästä johtuen matalia taajuuksia, joiden aallonpituus on pitkä, on vaikea absorboida. Esimerkiksi taajuuden 80 Hz aallonpituus on 4,3 metriä ja neljännes siitä on 1,08 metriä. Näin ollen 80 Hz taajuuksia sitoo parhaiten huokoinen materiaali, joka on 1,08 metriä paksu. Rakennusten käytännön kannalta näin paksut materiaalit eivät ole käytännöllisiä. Matalien ja keskitaajuuksisten ääniaaltojen absorbointiin käytetäänkin usein rei'itettyjä rakennuslevyjä tai levyresonaattoreita. Absorptiosuhde sekä taajuus, jota rei'itetty rakennuslevy absorboi parhaiten, riippuvat levyn takana olevan ilmapälin paksuudesta, reikien lukumäärästä, reikien koosta, reikien muodoista ja rakennuslevyn paksuudesta (Kylliäinen 2006). Levyresonaattoreissa ehjän levyn takana on tyhjä tai mineraalivillalla täytetty ilmapäli. Levyresonaattori voi olla esimerkiksi levyrakenteinen seinä, ikkuna, ovi tai jokin ohut rakennuslevy, kuten vaneri- tai lastulevy (Kylliäinen 2006). Levyresonaattorit absorboivat parhaiten matalia taajuuksia. Seinälevyn painoa pienentämällä ja ilmapäliä suurentamalla voidaan levyresonaattori muuttaa ääntä heijastavaksi (Kylliäinen 2006).

Beranekin ja Istvan (1992) mukaan kuitupohjaisten huokoisten materiaalien äänen absorptioon vaikuttavat eniten materiaalin huokoisuus, ominaisvirtausvastus ja huokoisuuden eri muodot. Huokoisuus määritellään huokosten sisältämän ilman suhteena koko materiaalin tilavuuteen. Mitä huokoisempi materiaali on, sitä suurempi on ääniaaltojen häviö huokosten aiheuttaman kitkan vuoksi. Huokoisuus voidaan määritellä yksinkertaisesti kaavalla:

$$\emptyset = \frac{V_a}{V_a + V_b} \quad (2)$$

jossa \emptyset kuvaa huokoisuutta, V_a huokosten tilavuutta ja V_b materiaalin kiinteää tilavuutta (Beranek ja Istvan 1992).

Ominaisvirtausvastus kuvaa materiaalin läpi kulkevan ilman vastusta tietyllä ilmanvirtausnopeudella. Jos materiaalilla on korkea ominaisvirtausvastus, ilman on vaikea päästä kulkemaan materiaalin läpi. Ominaisvirtausvastuksessa otetaan huomioon myös materiaalin paksuus. Virtausvastus voidaan määritellä seuraavan kaavan avulla (Nousiainen ja Hongisto 2001):

$$R = \frac{A \Delta P}{LU} \quad (3)$$

jossa ominaisvirtaus vastus on R [mks rayl/m ($\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)], ilmanpaineen muutos ΔP [Pa], materiaalin pinta-ala A [m^2], materiaalin paksuus L [m] ja U ilmavirran tilavuusnopeus [m^3/s].

Huokoisuuden muodoilla kuvataan materiaalin toisiinsa yhteydessä olevien huokosten epäsäännöllistä rakennetta, eli mutkittelevuutta ja kiemuraisuutta. Korkeilla taajuuksilla se aiheuttaa ääniaaltojen nopeuden hidastumista äänen kulkiessa materiaalin läpi (Beranek ja Istvan 1992). Mitä kiemuraisempia huokokset ovat, sitä enemmän tapahtuu ääniaaltojen häviötä eli materiaalin kyky absorboida ääntä kasvaa (Beranek ja Istvan 1992). Kiemuraisuutta on vaikea mitata, sillä huokokset ovat epäsäännöllisen muotoisia.

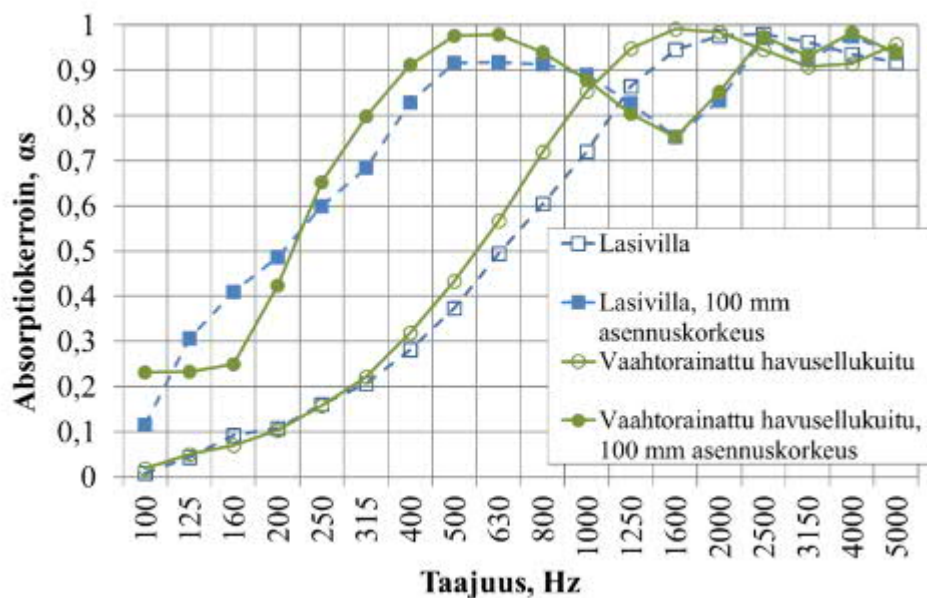
Koizymmin ym. (2002) mukaan kuidun läpimitalla on merkitystä kuidun absorptio-kanalta. Kuidun läpimitan pienentyessä tarvitaan kuituja lukumäärältään enemmän täyttämään sama tilavuus kuin suuren läpimitan kuituja. Kuitujen määrän lisääntyessä lisääntyy myös kiemuraisten huokosten määrä, mikä puolestaan nostaa ominaisvirtausvastusta ja näin ollen parantaa äänen absorptiota. Tämän teorian mukaan läpimitaltaan ja pituudeltaan pienempien lehtipuukuitujen tulisi absorboida ääntä tehokkaammin, kuin pitkä- ja leveäkuituisen havusellun.

3.3 Selluloosapohjaiset absorptiomateriaalit

Vaahtorainatun sellulevyn äänenabsorptioon vaikuttavat Jahangirin ym. (2016) tutkimusten mukaan levyn paksuus, ilmapitoisuus ja tiheys. Ilmapitoisuuden noustessa 50 %:sta 70 %:iin laski äänen absorptiosuhde, kun taas tiheyden ja paksuuden noustessa äänen absorptiosuhde kasvoi. Eli korkea absorptiosuhde saavutetaan tiheällä ja paksulla sellulevyllä, jonka ilmapitoisuus ei ole liian suuri. Tiheys onkin yksi merkittävimmistä tekijöistä, joka vaikuttaa sellulevyn absorptiokertoimeen. Mitä tiheämpi näyte on, sitä enemmän siinä on kuituja ja näin myös mutkittelevia huokosia, jotka aiheuttavat ääniaaltojen häviötä (Koizumi ym. 2002). Tiheyden kasvattaminen nostaa absorptiokykyä kuitenkin vain tiettyyn pisteeseen, minkä jälkeen osa ääniaalloista heijastuu takaisin ja sellulevy alkaa toimia ääntä heijastavana pintana.

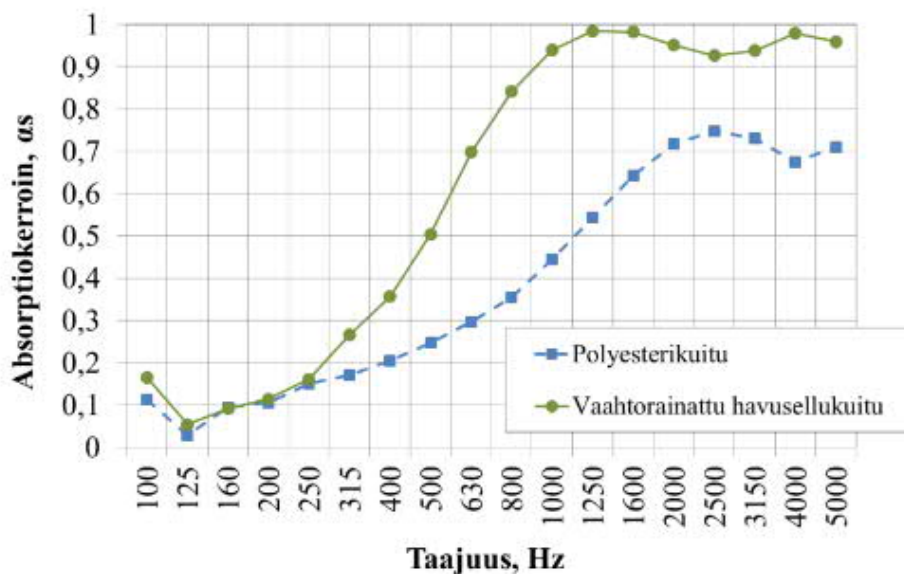
Pöhler ym. (2016) vertasivat sulfaattihavusellusta vaahtorainatun levyn äänen absorptiokykyä yleisesti käytettävien absorptiomateriaalien absorptiokykyyn. Vertailumateriaa-

leina toimivat lasivilla, eristehuopa, polyuretaanivaaho ja polyesterilevy. Sellulevyt valmistettiin vaahdottamalla sellua veden ja natriumlauryylisulfaatin (SDS) kanssa. Seosta sekoitettiin, jolloin se vaahtosi ja syntyi huokoinen kevyt vaahtorakenne, jonka ilmapiitoisuus oli 50–70 %. Vaahto kuivattiin ja puristettiin haluttuun paksuuteen. Impedanssi-putkessa tehdyissä tutkimuksissa huomattiin, että vaahtorainatun havusellulevyn absorptiokerroin on hyvin lähellä kaupallisen lasivillan absorptiokerrointa. Kuvasta 8 voidaan huomata, että keskipitkillä taajuuksilla 250–1000 Hz havusellulevyn absorptiokerroin on hieman korkeampi kuin lasivillan. Äänen absorptiokerroin mitattiin asennuskorkeudella 0 mm ja 100 mm. Molempien materiaalien paksuus oli sama 30 mm, mutta sellulevyn paino oli pienempi. Materiaalin keveys on etu, sillä rakennuksissa suositaan kevyitä absorptiomateriaaleja (Kylliäinen 2006).



Kuva 8. Akustisen lasikuitulevyn ja havusellukuitulevyn absorptiokertoimet materiaalien paksuuden ollessa 30 mm (Pöhler ym. 2015).

Kuvasta 9 voidaan nähdä, että vaahtorainatun havusellulevyn äänen absorptiokerroin on selkeästi korkeampi kuin polyesterikuitulevyn. Ero johtuu havusellulevyn suuremmasta ilman ominaisvirtausvastuksesta, joka polyesterikuitulevyllä oli 5060 Ns/m⁴ ja havusellulevyllä 24700 Ns/m⁴ (Pöhler ym. 2016).



Kuva 9. Akustisen polyesterikuitulevyn ja havusellukuitulevyn absorptiokertoimet materiaalien paksuuksien ollessa 40 mm (Pöhler ym. 2015).

4 AINEISTO JA MITTAUSMENETELMÄT

4.1 Aineisto

Tutkimuksen raaka-aineina käytettiin sulfaatti havusellua, sulfaatti lehtipuusellua, havuliukoselluja ja lehtipuuliukosellua. Havuselluissa pääpuulajina toimi mänty ja lehtipuuselluissa koivu. Molempia sulfaattiselluja oli kolmesta eri valkaisun vaiheesta: valkaisuamaton sellu, happivalkaistu sellu ja täysin valkaistu sellu. Liukoselluja oli kaksi erilaista, havuliukosellu ja lehtipuuliukosellu. Tutkimuksessa käytettäviä erilaisia selluja oli siis yhteensä kahdeksan (Taulukko 2). Sellut olivat peräisin Stora Enson Uimaharjun tehtaalta. Valkaisemattomia selluja, happivalkaistuja selluja sekä valkaistua lehtipuusellua ei ole koskaan kuivattu. Liukosellut ja valkaistu havusellu on sen sijaan selluvalmistusprosessissa kertaalleen kuivattu. Kuivattujen ja arkitettujen sellujen kosteusprosentti oli selkeästi pienempi kuin kuivaamattomien massan muodossa olevien sellujen (Taulukko 2).

Taulukko 2. Sellulajit ja niiden kosteusprosentit.

	Kosteus prosentti %	Olomuoto
Lehti valkaisematon	67	Ei kuivattu massa
Lehti happivalkaistu	67	Ei kuivattu massa
Lehti valkaistu	67	Ei kuivattu massa
Lehtiliukosellu	8	Kuivattu arkki
Havu valkaisematon	65	Ei kuivattu massa
Havupuu happivalkaistu	65	Ei kuivattu massa
Havu valkaistu	6	Kuivattu arkki
Havuliukosellu	5	Kuivattu arkki

Kuvassa 10 näkyy miten ligniinin määrä vaikuttaa sellun väriin. Valkaisematon sellu oli tumman ruskeaa, sillä ligniini värjäsi sen ruskeaksi. Happivalkaistu sellu oli vaalean ruskeaa, sillä osa ligniinistä oli jo poistettu. Valkaistut sulfaattisellut sekä liukosellut olivat hyvin valkoisia, sillä niissä oli jäljellä erittäin vähän ligniiniä.



Kuva 10. Sellulajit vasemmalta oikealle: valkaisematon havusellu, happivalkaistu havusellu, valkaistu havusellu, havuliukosellu, valkaisematon lehtipuusellu, happivalkaistu lehtipuusellu, valkaistu lehtipuusellu ja lehtipuuliukosellu.

4.2 Näytteiden valmistus

Sellusta valmistettiin vaahtorainauksen avulla huokoisia levyjä. Vaahdotusaineena toimi natriumlauryylisulfaatti eli SDS. Jokaisesta sellulajista valmistettiin kaksi näytettä, korkean ja matalan tiheyden sellulevy. Näin saatiin yhteensä 16 erilaista sellulevyä. Korkean tiheyden sellulevyihin käytettiin 5 grammaa SDS:a ja matalan tiheyden näytteisiin käytettiin 40 grammaa SDS:a. Jokaisessa sellulevyssä käytettiin kuivapainoltaan 200 grammaa sellua. Ensinnäkin selluarkit turvotettiin suuressa korkeassa astiassa 15 minuuttia, jossa oli 10 litraa vettä. Seosta sekoitettiin, jotta kuidut irtosivat toisistaan. Kuivaamattomia massan muodossa olevia selluja ei turvotettu ennen sekoitusta. Kuitususpension sekaan lisättiin 5 tai 40 grammaa SDS:a ja seosta vaahdotettiin sekoittamalla 15 minuuttia. Vaahdottajana toimi maalinsekoittaja, johon oli kiinnitetty pyörivä sekoitusterä, jossa oli neljä taivutettua pyöreää peltilevyä (Kuva 11). Vaahdotuslaitteisto valmistettiin mukaillen Lappalaisen ja Lehtosen (2001) sekoitusteriä ja vaahdotuskonetta. Vaahdotettaessa kuidut tarttuivat ilmakuplien pinnoille muodostaen ilmavan rakenteen. Kuituvaahdo kaadettiin 40 cm x 40 cm muottiin (Kuva 12), jonka pohjassa oli veden läpäisevä tiivis metalliverkko sekä tukea antava isoreikäinen metalliverkko. Ylimääräisen veden annettiin valua verkon läpi 15 minuuttia, jonka jälkeen muotti poistettiin ja näyte vietiin verkon päällä kuivumaan lämpimään konttiin vuorokaudeksi (Kuva 13). Näytteitä kuivattiin suljetussa kontissa lämpimän 40–50 asteisen ilmavirran avulla. Korkean tiheyden näytteiden päälle asetettiin rei'itetty metallilevy ja paino, joka painoi näytteet kolmen senttimetrin paksuiksi. Painon avulla saatiin saman paksuisia levyjä. Matalan tiheyden näytteiden päällä ei ollut painoa.



Kuva 11. Vaahdotuksessa käytetty nelilevyinen terä.



Kuva 12. Muotti, johon kuituseos kaadettiin kaatolevyä pitkin. Pohjalla oli vedenläpäisevä metalliverkko sekä metallinen tukiverkko.



Kuva 13. Valmiit sellulevyt kuivumassa.

Kuivumisen jälkeen selluvahtolevyistä leikattiin ympyrälieriön muotoisia halkaisijaltaan noin 29 mm näytteitä äänen absorptiomittauksia varten. Sellunäytteistä poistettiin ylä- ja alapinta, sillä niissä kuidut olivat pakkaantuneet tiiviimmin, kuin näytteen keskellä. Näytteiden haluttiin siis olevan rakenteeltaan mahdollisimman homogeenisiä. Samalla saatiin määriteltä tarkasti näytteiden korkeus. Korkean tiheyden näytteet olivat

korkeudeltaan 2,1 senttimetriä ja matalan tiheyden näytteet 4,0 senttimetriä. Korkean tiheyden näytteiden tiheys vaihteli 33–54 kg/m³ välillä ja matalan tiheyden näytteiden 8–12 kg/m³ välillä.

4.3 Kuidun hienorakenteen mittaus

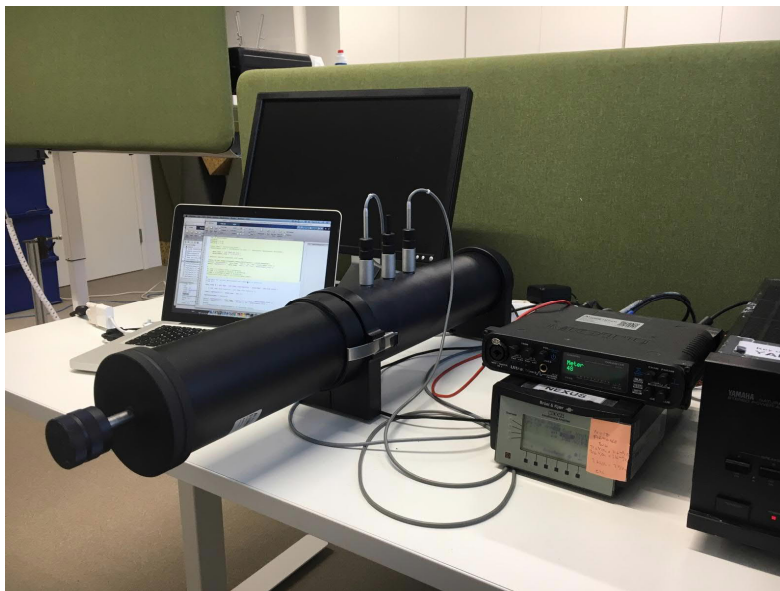
Kuidun pituus ja leveys mitattiin sellukuiduista ennen vaahtorainausta Metson Fiberlab-laitteen avulla. Kuituanalysaattori mittaa suuren määrän yksittäisiä kuituja ja laskee niistä kuva-analyysin avulla ominaisuuksien keskiarvot sekä määrittelee ne pituus-, leveys- ja massajakauman suhteen. Kuva-analyysi perustuu laservalon polarisaatioon (Mörseburg ym., 1999). Fiberlabin avulla saatiin eri sellulajien kuidun pituuksien ja leveyksien pituuspainotetut keskiarvot.

Kuidun ominaispinta-ala ja huokosten keskihalkaisija laskettiin vaahtorainauksen ja kuivaamisen jälkeen BET-teoriaa (Brunauer-Emmet-Teller) hyödyntäen (Ceccherini ja Maloney 2019). Ominaispinta-ala mitattiin myös ennen vaahtorainausta, jotta nähtiin vaahtorainauksen ja kuivaamisen vaikutus kuidun pinta-alaan. BET-teoriassa kuidun pinta-ala lasketaan adoptoituneen typpikaasun tilavuuden, paineen muutoksen ja kuidun huokosten tilavuuden avulla. Kaasun oletetaan kiinnittyvän kiinteään aineen pinnalle yhden molekyylin paksuiseksi kerrokseksi, jolloin typen määrä seoksessa laskee. Typpimolekyyli on 77 Kelvinin lämpötilassa pinta-alaltaan 0,162 nm² ja sen avulla voidaan laskea adsorboituneen kaasun ominaispinta-ala, joka on sama kuin näytteen pinta-ala (Barnes & Gentle 2005). BET tutkimuksen avulla saadaan tarkimmat tulokset huokosten halkaisijan ollessa 2–50 nm. Samalla saadaan määriteltyä myös huokosten keskimääräinen halkaisija ja tilavuusjakauma BJH (Barrett-Joyner-Halenda) -menetelmän avulla typpikaasun absorptioisotermeistä. Siinä huokosten oletetaan olevan lieriön muotoisia.

Kuitujen hiilihydraatti eli selluloosa- ja hemiselluloosapitoisuudet sekä ligniinin määrä näytteistä laskettiin korkean erotuskyvyn anioninvaihtokromatografian (HPAEC) ja NREL -menetelmän avulla sellukuiduista ennen vaahtorainausta (Sluiter ym. 2008). Hiilihydraattien määrä laskettiin Dionex ICS-3000 HPAEC-PAD -laitteiston avulla (Sluiter ym. 2008). Selluloosa- ja hemiselluloosapitoisuudet määritettiin monosakkaridien määristä. Ligniinin määrä saatiin laskemalla yhteen liukenematon ja happoliukoinen ligniini. Happoliukoisen ligniinin määrä saatiin laskettua UV-valon absorptiota hyödyntämällä.

4.4 Äänen absorptio mitta

Vaahtorainattujen sellulevyjen absorptiosuhde mitattiin impedanssiputkella (Kuva 14) standardin EN ISO 10534-2:2001 mukaisesti käyttäen siirtofunktiomenetelmää. Standardin mukaan putki on yleensä poikkileikkaukseltaan pyöreä ja seinät on tehty metallista, jotta ne ovat sileät, jäykät ja tiheät. Seinissä ei saa olla viiltoja tai reikiä. Putki ei myöskään saa värähdellä äänisignaaleista. Putken toiseen päähän asetetaan näyte ja toisessa päässä on kaiutin, joka lähettää ääniaaltoja eri taajuuksilta. Ääniaallot törmäävät näytteeseen ja osa niistä absorboituu näytteeseen ja osa kimpoaa takaisin. Alkuperäisen ja takaisin kimmonneen ääniaallon erotuksesta voidaan laskea siirtofunktion avulla näytteen absorptiokerroin. Putkessa on kaksi mikrofonia, jotka mittaavat äänen painetta. Menetelmä perustuu äänenpaineen mittaukseen kahden mikrofoniin avulla, jotka sijaitsevat eri kohdissa putkea. Absorptiokerroin lasketaan kahden mikrofoniin välistä käyttäen siirtofunktiota, jolla voidaan mitata useita taajuuksia yhdellä mittauksella (EN ISO 10534-2:2001). Tässä tutkimuksessa käytettiin putkea, jonka halkaisija on 29 millimetriä ja absorptiokerroin mitataan taajuuksilla 500–6300 Hz. Leikatut sellulevynäytteet olivat yhtä leveitä kuin putki, eli noin 29 millimetriä (Kuva 15). Näytteitä säilytettiin huoneenlämmössä, jolloin näytteet eivät olleet täysin kuivia mittaushetkellä. Absorptiokertoimet mitattiin myös lasivillasta.



Kuva 14. Impedanssiputki absorptiokertoimien määrittämistä varten.



Kuva 15. Impendanssiputkessa käytettävät näytteet, joiden halkaisija on noin 29 mm.

5 TULOKSET

5.1 Kuidun pituus ja leveys

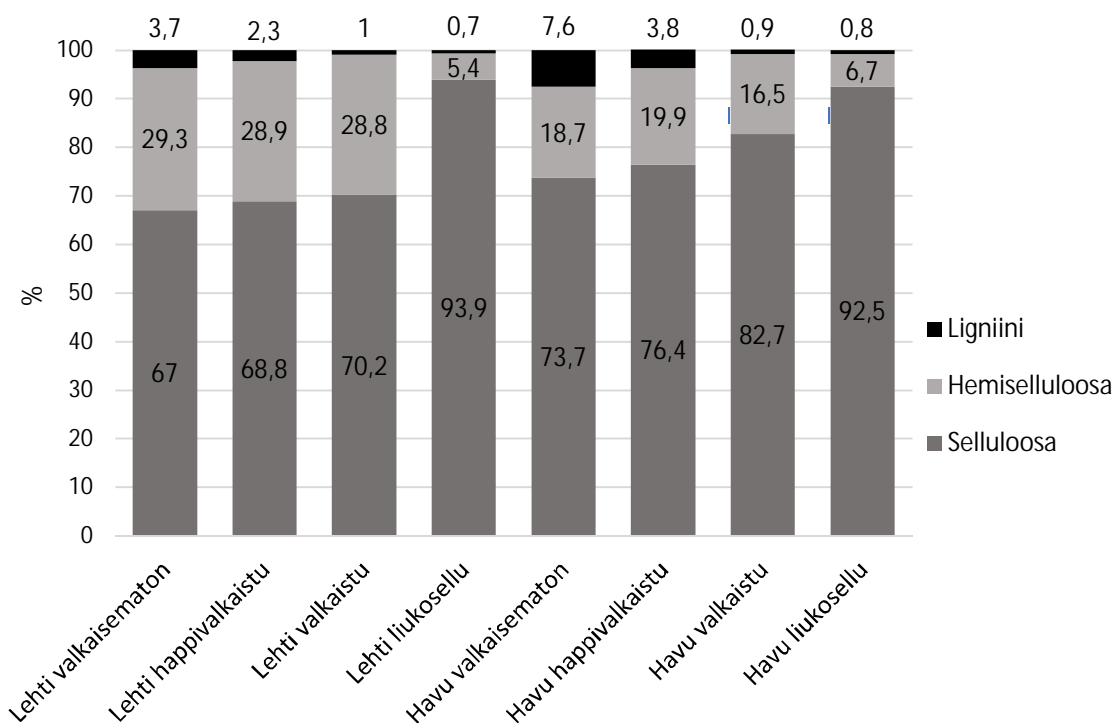
Fiberlabilla mitattiin kuidun pituuspainotettu kuidun pituus ja leveys. Taulukosta 3 nähdään, että lehtipuiden kuidun pituus on lähellä yhtä millimetriä ja havupuilla pituus on hieman yli kaksi millimetriä. Kuidun pituus laskee sellun valmistusprosessissa eteenpäin mentäessä, poikkeuksena kuitenkin valkaistun havusellun kuidun pituus. Havuselluilla kuidun leveys pienenee prosessin edetessä. Lehtipuuselluilla kuidun leveys puolestaan hieman kasvaa poikkeuksena kuitenkin lehtiliukosellun pieni kuidun leveys muihin selukuituihin verrattuna.

Taulukko 3. Kuitujen pituuspainotettu pituus ja leveys

	Pituus mm	Leveys μm
Lehti valkaisematon	1,04	20,03
Lehti happivalkaistu	0,97	20,28
Lehti valkaistu	0,94	20,71
Lehtiliukosellu	0,86	16,32
Havu valkaisematon	2,29	28,31
Havu happivalkaistu	2,14	27,49
Havu valkaistu	2,23	25,36
Havuliukosellu	2,05	23,83

5.2 Sellun kemiallinen koostumus

Ligniinin ja hemiselluloosan osuus vähenee mentäessä sellunvalmistusprosessia eteenpäin (Liite 1), eli eniten ligniiniä ja hemiselluloosaa on valkaisuamattomissa selluissa ja selvästi vähiten liukoselluissa. Kuvasta 16 nähdään, että havuselluissa on enemmän ligniiniä ja vähemmän hemiselluloosaa kuin lehtipuuselluissa. Ligniinin määrä vähenee selkeästi happivalkaisun ja lopullisen valkaisun myötä. Liukosellujen hemiselluloosapitoisuus on merkittävästi pienempi kuin muiden sellujen ja niiden selluloosapitoisuus on yli 90 %.

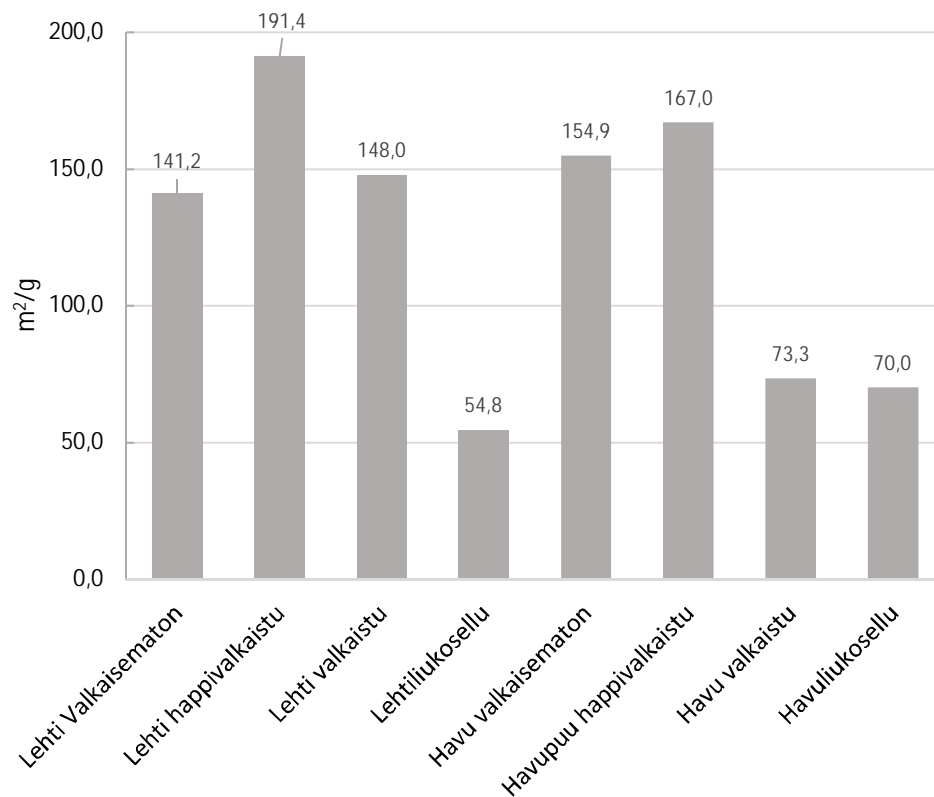


Kuva 16. Eri sellutyyppien kemiallinen koostumus prosentiosuuksina.

5.3 Huokoisuus ja ominaispinta-ala

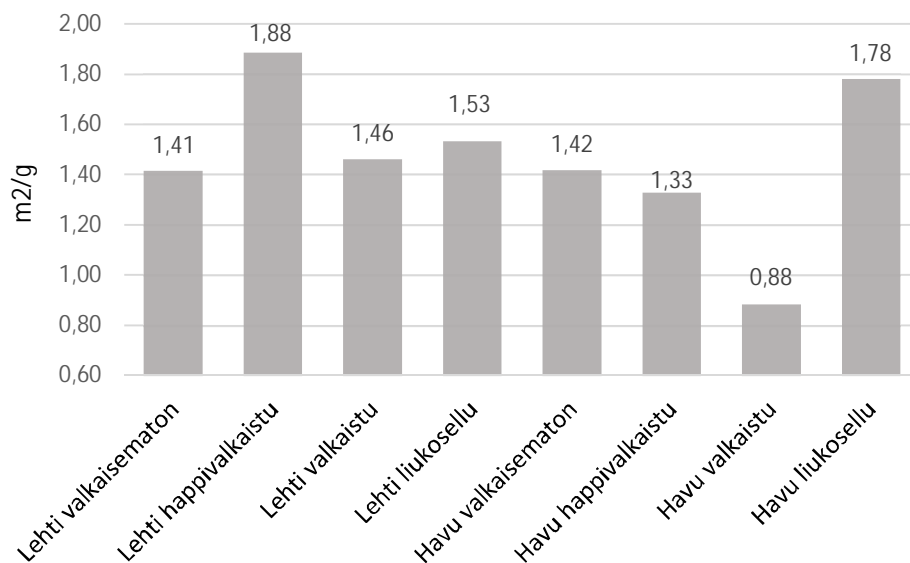
Kuvassa 17 nähdään eri sellutyyppien ominaispinta-alat ennen vaahtorainausta. Lehti-liukosellun, valkaistun havusellun ja havuliukosellun pinta-alat ovat selkeästi muita pienempiä, sillä ne on sellun valmistusprosessissa kerran jo kuivattu. Niissä on jo tapahtunut

hornifikaatiota. Muissa selluissa pinta-ala kasvaa hieman happivalkaisun myötä ja suurin ominaispinta-ala onkin happivalkaistulla lehtipuusellulla.



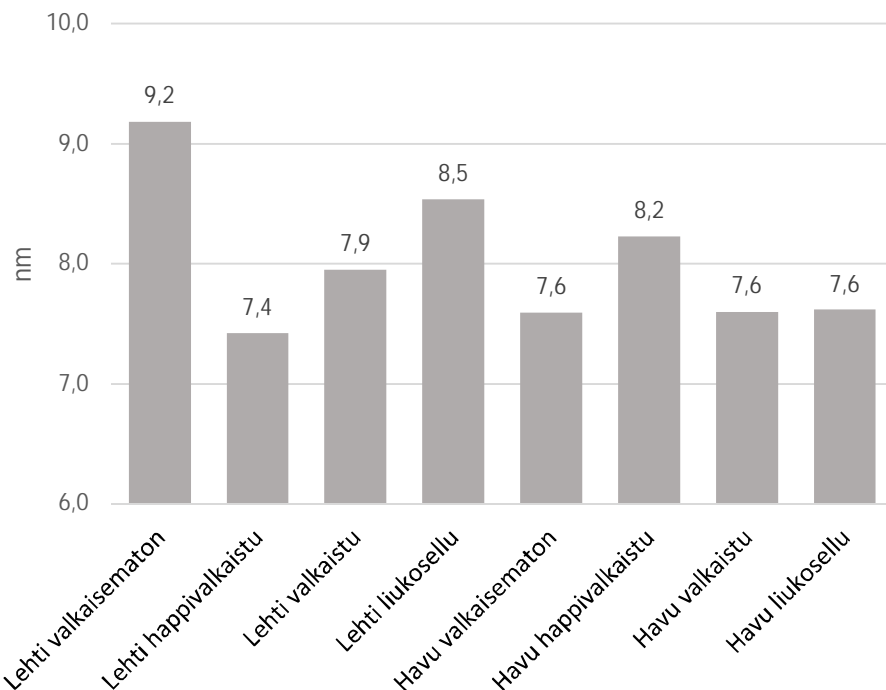
Kuva 17. Eri sellutyyppien ominaispinta-alat ennen vaahtorainautusta.

Vaahtorainaus ja kuivaus pienensivät kuitujen ominaispinta-alaa rajusti. Arvot tippuivat noin sadasosaan siitä, mitä ne olivat ennen vaahtorainautusta (Kuva 18). Vaahtorainauksen ja kuivaamisen jälkeen suurin ominaispinta-ala on happivalkaistulla lehtipuusellulla ja selkeästi pienin valkaistulla havusellulla. Sellun käsittelyn ja sen pinta-alan välillä ei näytä olevan yhteyttä. Esimerkiksi lehtipuuselluilla suurin pinta-ala on happivalkaistulla sellulla, kun taas havuselluilla se on liukosellulla.



Kuva 18. Vaahtorainattujen sellujen ominaispinta-alat.

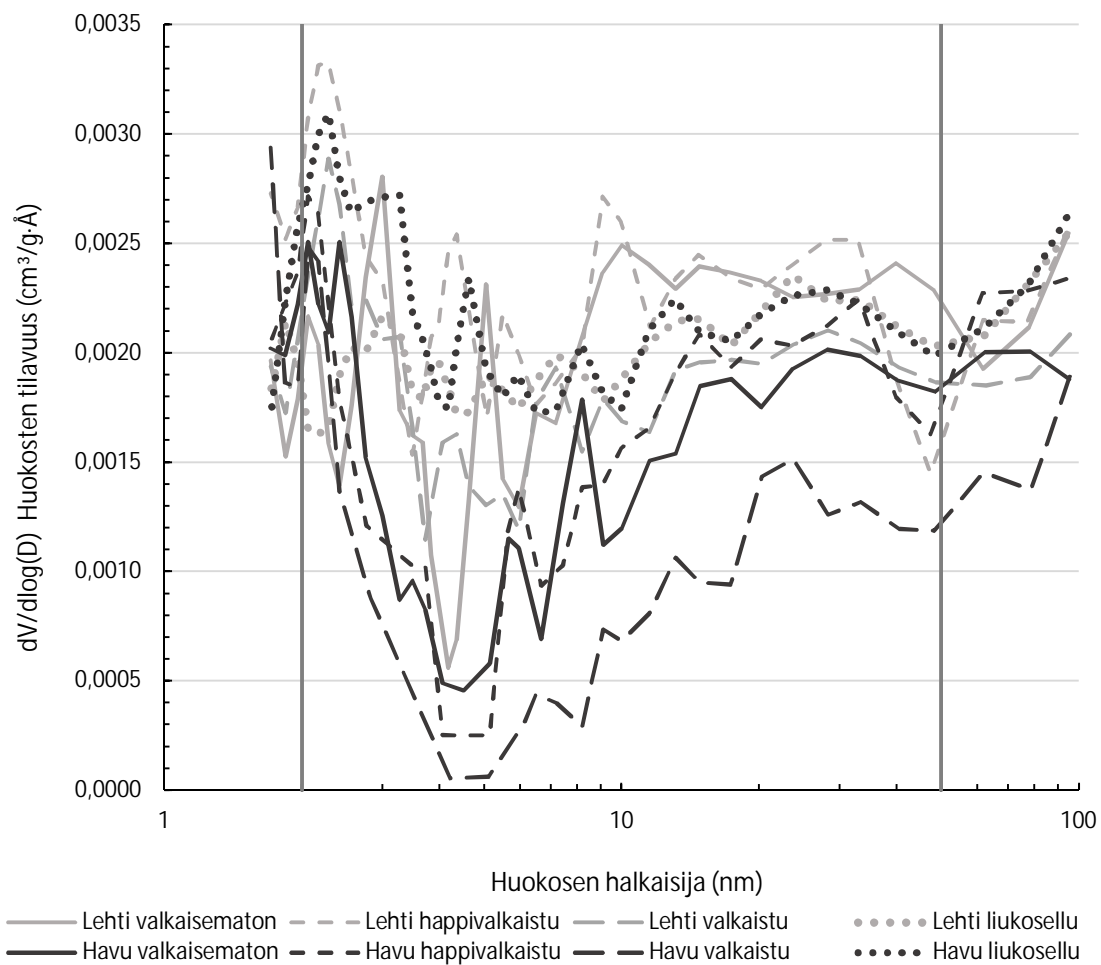
Huokosten keskihalkaisija mitattiin vaahtorainauksen ja kuivauksen jälkeen. Suurin huokosten keskihalkaisija on valkaisemattomalla lehtipuusellulla ja pienin happivalkaistulla lehtipuusellulla (Kuva 19). Havuselluilla, lukuun ottamatta happivalkaistua havusellua, huokosten keskihalkaisijat ovat melko lähellä toisiaan, noin 7,6 nm (Kuva 19). Lehtipuuselluilla keskihalkaisija vaihtelee enemmän. Ominaispinta-alan ja huokosten keskihalkaisijan välillä ei näytä olevan selkeää yhteyttä (Liite 2). Happivalkaistulla lehtipuusellulla on suurin ominaispinta-ala (Kuva 18), mutta pienin huokosten keskihalkaisija (Kuva 19), kun taas valkaistulla havusellulla on pienin ominaispinta-ala (Kuva 18), mutta huokosten keskihalkaisija on keskiluokkaa (Kuva 19).



Kuva 19. Sellukuitujen huokosten keskihalkaisija vaahtorainauksen jälkeen.

Huokosten tilavuusjakaumaa tarkastellessa kuvasta 20 nähdään, että huokoskoko ja huokosten tilavuus vaihtelevat paljon sellujen välillä. Kuva esittää kuinka suuri on yhteenlaskettu huokosten tilavuus huokoskoon vaihdellessa 1,7–96 nm välillä. Suurimmat tilavuuspiikit löytyvät huokosten ollessa halkaisijaltaan 2–3 nanometriä. Pystysuorat viivat ovat logaritmisella x-asteikolla 2 nm sekä 50 nm halkaisijoiden kohdalla. Näiden arvojen väliin jäävät huokokset ovat mesohuokosia, jotka ovat tämän tutkimuksen kannalta oleellisiä. Tilavuusjakauma korreloi hyvin ominaispinta-alojen kanssa, sillä mitä suurempi on huokosten tilavuus, sitä suurempi on yleensä myös sellujen ominaispinta-ala.

Lehtipuilla on keskimäärin suurempi huokostilavuus kuin havupuilla riippumatta huokosten koosta (Kuva 19). Havuselluista liukosellu saa suurimmat arvot tilavuusjakaumassa, tilavuudeltaan eniten on 2–3 nm huokosia. Valkaistun havusellun tilavuusjakauma on selkeästi muita pienempi, samoin on sen ominaispinta-alakin. Happivalkaistulla lehtipuusellulla on matalin huokosten keskihalkaisija (Kuva 19), mikä näkyy myös sen tilavuusjakauman suurimpien arvojen keskittyessä pieniin halkaisijakokoihin (Kuva 20). Sillä on siis paljon pieniä huokosia verrattuina muihin selluihin.



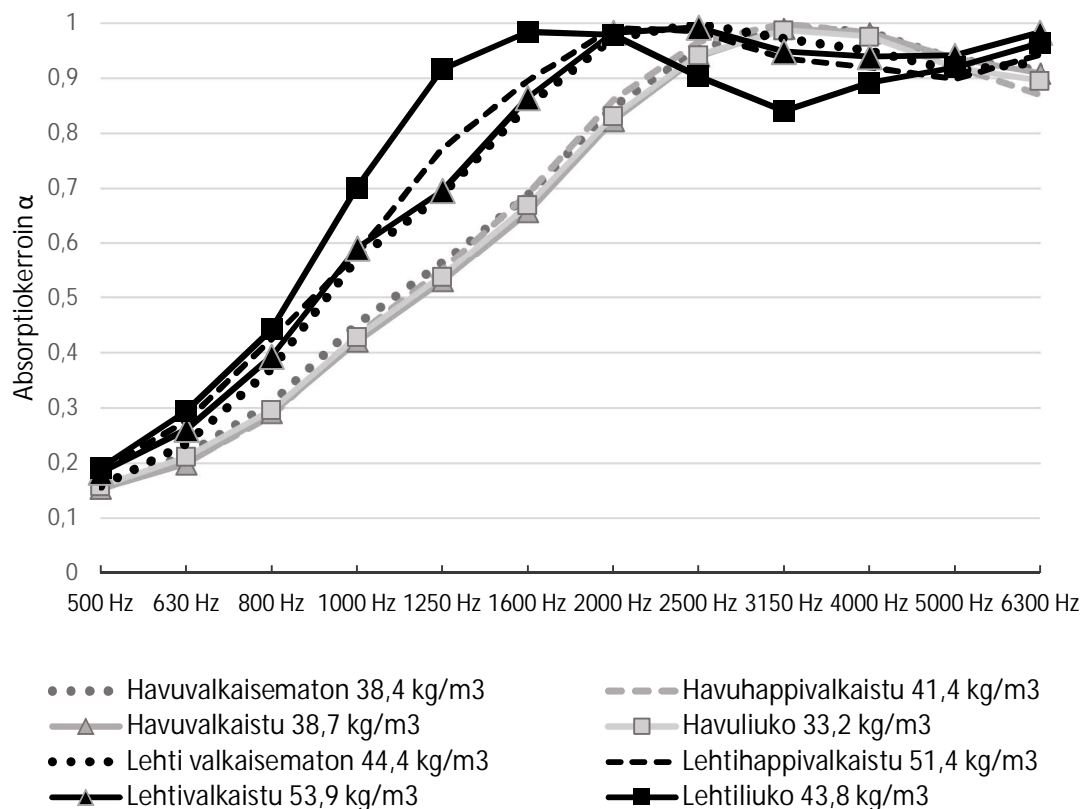
Kuva 20. Sellujen huokoskoon tilavuusjakauma huokosen halkaisijan funktiona. Pystysuorat viivat ovat 2 nm ja 50 nm kohdilla ja niiden välissä olevat huokokset ovat tutkimuksen kannalta merkittävimpiä mesohuokosia.

5.4 Äänen absorptio

5.4.1 Kuidun pituuden ja leveyden vaikutus

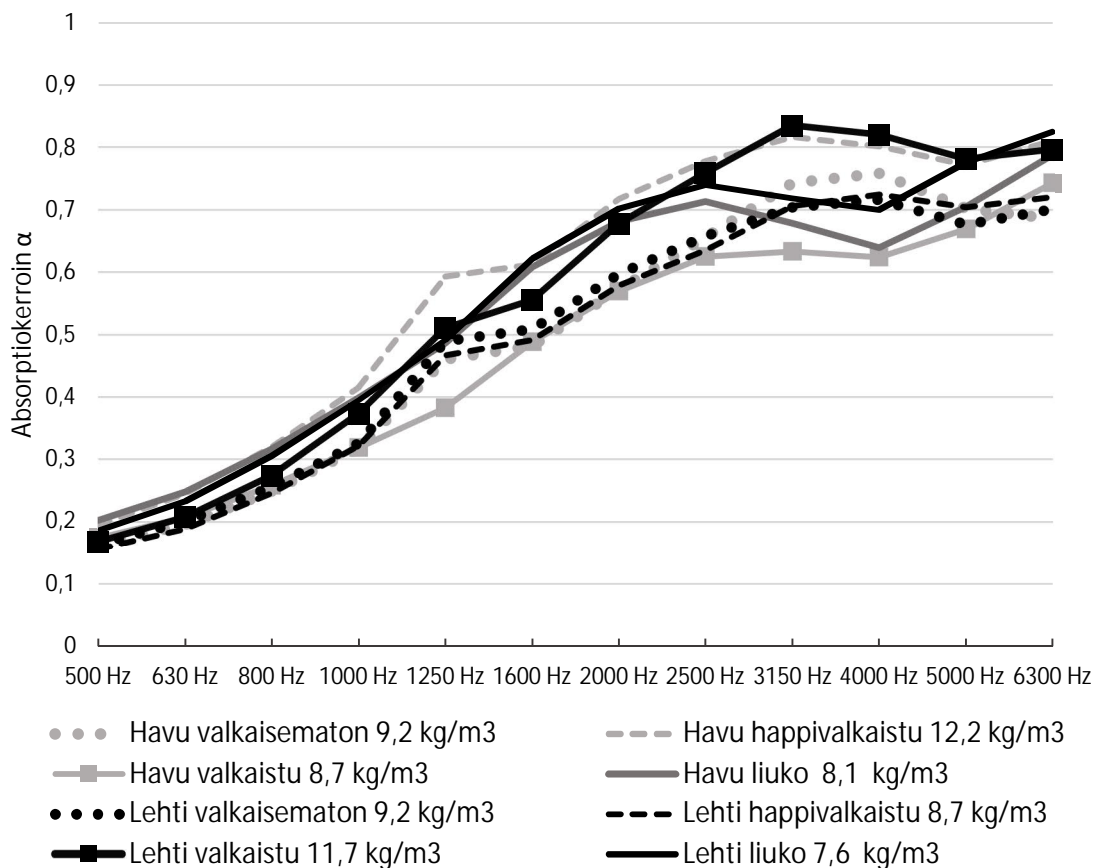
Absorptiokertoimien kuvaajista nähdään, että tiheys vaikuttaa näytteen äänenabsorptiokertoimeen kasvattamalla absorptiokerrointa (Kuva 21). Tiheyden vaikutus on niin suuri, että muiden ominaisuuksien vaikutusta on vaikea havaita, kun näytteiden tiheydet ovat eri suuruksia. Korkean tiheyden näytteiden tiheys vaihteli $33,2\text{--}53,9 \text{ kg/m}^3$ välillä (Liite 3). Kuvasta 21 nähdään, että lehtipuuselluilla on suurempi absorptiokerroin alle 2500 Hz taajuuksilla kuin havuselluilla, kun taas korkeammilla 2500–5000 Hz taajuuksilla tilanne

on päinvastainen. Lehtipuusellujen absorptiokertoimet eroavat toisistaan enemmän, sillä niiden tiheyksissä on enemmän hajontaa kuin havuselluilla. Lehtipuuselluilla on lyhyempi kuidun pituus ja kapeampi leveys, mutta lehtipuusellujen korkeampi absorptiokerroin selittyy suurelta osin sillä, että niiden tiheydet ovat merkittävästi suurempia kuin havusellujen. Happivalkaistulla lehtipuusellulla on hieman korkeampi absorptiokerroin alle 2000 Hz taajuuksilla kuin valkaistulla lehtipuusellulla, vaikka sen tiheys on pienempi. Tässä tapauksessa jokin muu ominaisuus vaikuttaa absorptiokertoimen tiheyttä enemmän. Havuselluilla happivalkaistun sellun absorptiokerroin on hyvin lähellä muiden havusellujen absorptiokertoimia, vaikka sen tiheys on muita suurempi. Molemmilla liuoselluilla on puolestaan korkeat absorptiokertoimet, vaikka niiden tiheydet ovat näytteistä pienimmät. Lehtipuuliukosellun absorptiokerroin on selkeästi korkeampi alle 2000 Hz taajuuksilla kuin tiheydeltään suurimman valkaistun lehtipuusellun.



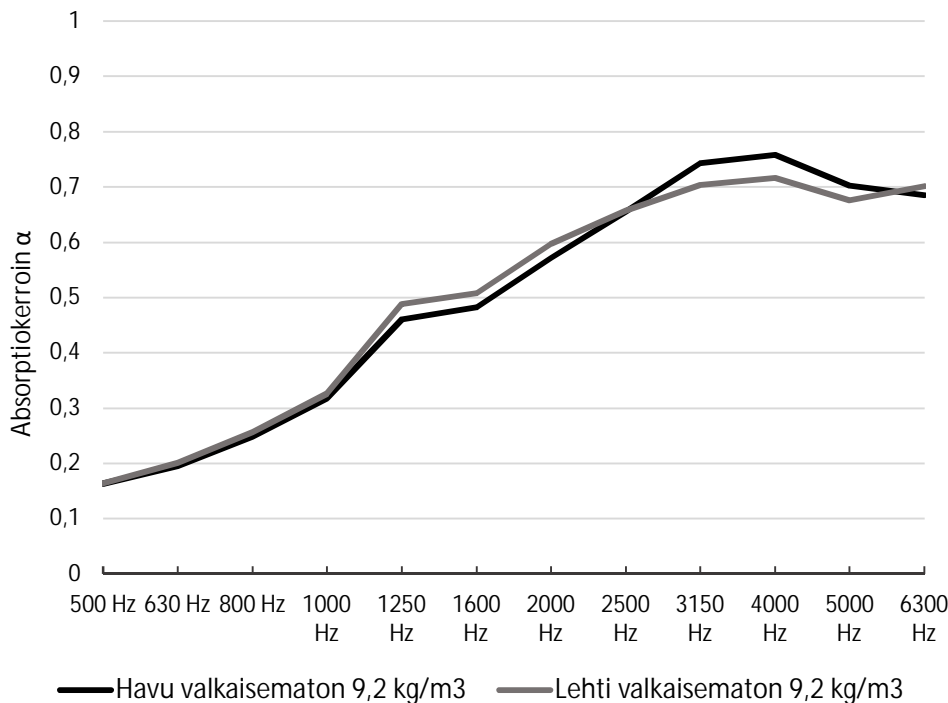
Kuva 21. Korkean tiheyden näytteiden absorptiokertoimet (näytteiden halkaisija 2,5 cm ja korkeus 2,1 cm).

Matalan tiheyden näytteissä absorptiokerrointen hajonta on pienempää näytteiden tiheyksien ollessa lähellä toisiaan (Kuva 22). Tiheys vaihteli 7,6–11,2 kg/m³ välillä (Liite 3). Korkein absorptiokerroin alle 3000 Hz taajuuksilla on happivalkaistulla havusellulla (Kuva 22), mikä johtuu suurelta osin sen korkeimmasta tiheydestä. Havu- ja lehtiliukoselluilla on korkeat absorptiokertoimet, vaikka niiden tiheydet ovat matalimmat. Liukoselluissa muut ominaisuudet vaikuttavat absorptiokertoimeen enemmän kuin tiheys. Muissa näytteissä absorptiokertoimet asettuvat tiheyden perusteella järjestykseen, eli mitä suurempi tiheys, sitä korkeampi absorptiokerroin. Lehti- ja havusellujen absorptiokertoimien välillä ei ole suuria eroavaisuuksia, vaikka lehtipuuselluilla on selvästi lyhyempi ja kapeampi kuidun pituus kuin havuselluilla. Kuidun pituus myös hieman laskee valkaisun edetessä, mutta valkaistun sellun absorptiokerroin ei systemaattisesti ole suurempi kuin valkaisemattoman sellun.



Kuva 22. Matalan tiheyden näytteiden absorptiokertoimet (Näytteiden halkaisija 2,5 cm ja korkeus 4 cm).

Matalan tiheyden näytteissä sekä valkaisemattoman havusellun että lehtipuusellun tiheys oli sama $9,2 \text{ kg/m}^3$ (Kuva 23). Tiheyksien ollessa samat, johtuvat absorptiokertoimien eroavaisuudet muista ominaisuuksista. Kuvasta 23 nähdään, että valkaisemattoman lehtipuusellun absorptiokerroin on hieman korkeampi matalilla taajuuksilla, kun taas yli 2500 Hz taajuuksilla se on korkeampi valkaisemattomalla havusellulla. Molempien sellujen ominaispinta-ala oli sama $1,4 \text{ m}^2/\text{g}$, mutta lehtipuusellulla on selkeästi lyhyemmät (1,04 mm) ja kapeammat (20,03 mm) kuidut kuin havusellulla (2,29 mm ja 28,31 mm). Kuvan 23 mukaan kuidun pituus ja leveys eivät merkittävästi vaikuta sellulevyn absorptiokertoimeen.

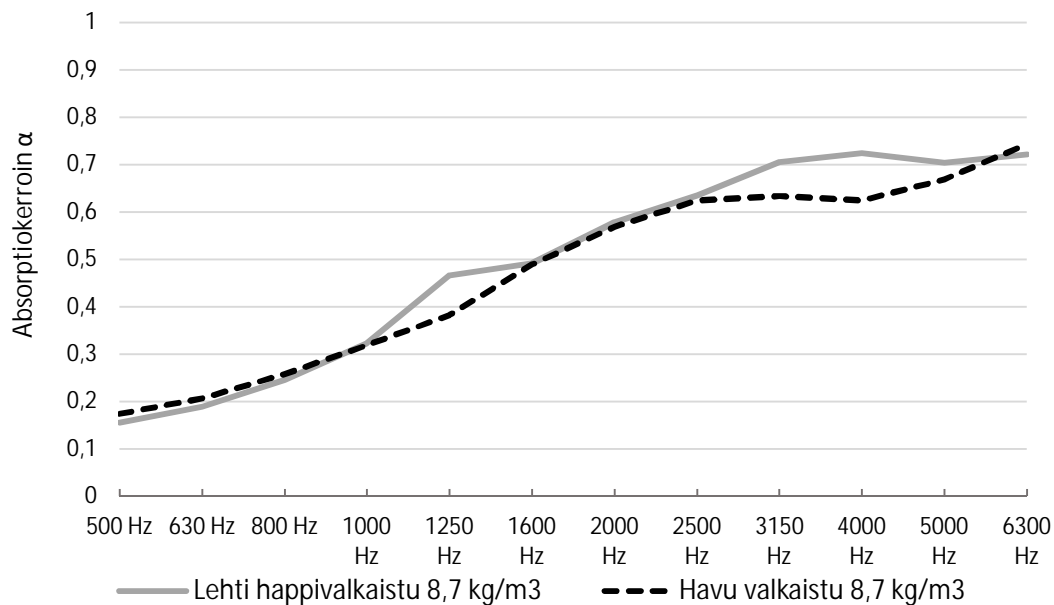


Kuva 23. Valkaisemattomien sellujen absorptiokertoimet tiheyden ollessa $9,2 \text{ kg/m}^3$.

5.4.2 Kuidun kemiallisen koostumuksen ja huokoisuuden vaikutus

Kuidun kemiallinen koostumus ja ominaispinta-ala riippuvat valkaisun vaiheesta. Valkaisun vaiheen ja absorptiokertoimen välillä ei nähdä yhteyttä niin, että esimerkiksi happivalkaistun lehtipuusellun absorptiokerroin olisi sekä matalan että korkean tiheyden näytteissä korkeampi kuin valkaisemattoman lehtipuusellun (Kuva 21 ja 22). Happivalkaistun lehtipuusellun ominaispinta-ala ($1,88 \text{ m}^2/\text{g}$) on suurempi kuin valkaisemattoman

lehtipuusellun ($1,41 \text{ m}^2/\text{g}$). Vaikka happivalkaistulla lehtisellulla on suurempi ominaispinta-ala, ei sen absorptiokerroin ole systemaattisesti valkaisuamatonta lehtipuusellua korkeampi. Valkaistulla havusellulla on selkeästi pienin ominaispinta-ala ($0,88 \text{ m}^2/\text{g}$) ja happivalkaistulla lehtipuusellulla suurin ($1,88 \text{ m}^2/\text{g}$). Niiden absorptiokertoimet eivät kuitenkaan juuri eroa toisistaan (Kuva 24), vaikka näytteiden tiheydet ovat samat. Absorptiokertoimien perusteella kuidun kemiallinen koostumus ja siten ominaispinta-ala eivät vaikuta merkittävästi sellulevyn absorptiokertoimeen.



Kuva 24. Matalan tiheyden happivalkaistun lehtipuusellun ja valkaistun havusellun absorptiokertoimet.

Vaahtorainattujen ja kuivattujen kuitujen huokoskoon tilavuusjakaumassa ei pystytä havaitsemaan selkeitä keskittymiä. Huokosten tilavuus ja huokoskoko vaihtelevat suuresti jokaisella eri sellutyypillä. Huokosten keskihalkaisija ei tässä tapauksessa kuvaa selkeästi huokoskoon painopistettä, vaan antaa vain huokosten keskiarvon. Huokosten tilavuusjakauman ja huokosten keskihalkaisijan vaikutusta absorptiokertoimeen ei tästä syystä tarkastella.

6 TULOSTEN TARKASTELU

6.1 Kuidun pituus ja leveys

Scallanin ja Greenin (2007) mukaan kuidun pituus ja leveys laskevat hieman sellun valmistusprosessin edetessä. Mittaustuloksissa tämä toteutuu lehtipuuselluilla, sillä niiden kuidun pituus laskee valkaisemattomasta sellusta liukoselluun melko tasaisesti. Havupuullakin kuidun pituus laskee prosessin edetessä, mutta valkaistun havusellun kuidun pituus on hieman suurempi kuin happivalkaistun sellun. Tämä pieni ero voi johtua eri sellunkeittoerien puuaineen eroavaisuuksista tai raaka-aineen alkuperästä. Esimerkiksi kuidun keskipituus riippuu siitä, onko puuaine harvennuksilta, jolloin kuituaines on lyhyempää vai päätehakkuulta, jolloin kuituaines on pidempää (Tyrväinen 1995).

Havupuilla kuidun leveys laskee prosessin edetessä, kun taas lehtipuulla se nousee lehti-liukosellua lukuun ottamatta. Ligniinin poistaminen mahdollistaa vesimolekyylien pääsyn soluseinän väleihin, mikä voi aiheuttaa kuidun turpoamista leveyssuunnassa (Maloney 1997). Tämä selittää lehtipuusellujen leveyden kasvun. Liukoselluilla on selkeästi lyhyemmät ja kapeammat kuidut kuin sulfaattiselluilla, koska esihydrolyysi ja vahva sellun keittoprosessi saavat selluloosan molekyyliketjut katkeilemaan enemmän kuin sulfaattisellussa (Al-Dajani ja Tschirner 2010).

6.2 Sellun kemiallinen koostumus

Sellujen kemialliset koostumukset sijoittuvat hyvin kirjallisuuden antamiin viitearvoihin (Alén 2000a). Liukosellujen korkea selluloosapitoisuus ja vähäinen hemiselluloosa- ja ligniinipitoisuus erottavat ne selkeästi muista selluista. Kemiallista koostumusta mitattaessa liukenemattoman ligniinin seassa saattaa olla jäämiä hydrolysoimattomista aineista, mikä kasvattaa ligniinin prosenttiosuutta. Tämä on kuitenkin hyvin epätodennäköistä ja vaikutus tähän tutkimukseen on hyvin pieni.

6.3 Pinta-ala ja huokoisuus

Vaahtorainaus ja kuivaus vaikuttivat kuitujen ominaispinta-alan arvoihin huomattavasti. Esimerkiksi valkaisuamattoman havusellun ominaispinta-ala ennen vaahtorainausa on $141 \text{ m}^2/\text{g}$ ja vaahtorainauksen jälkeen $1,41 \text{ m}^2/\text{g}$. Vaikka arkin muodossa olevat sellut oli jo aikaisemmin kuivattu sellunvalmistusprosessissa, niiden valmiiksi pienempi ominaispinta-ala asettui vaahtorainauksen ja ilmakeivauksen jälkeen samalle tasolle massan muodossa olevien sellujen kanssa. Vaahtorainaus ja ilmakeivaus vaikuttivat kaikkiin sellunäytteisiin samalla voimakkuudella lähtötilanteesta riippumatta. Ominaispinta-alan pieneneminen vaahtorainauksen jälkeen johtuu suurelta osin ilmakeivauksesta ja sen aiheuttamasta mesohuokosten romahtamisesta. Lovikan ym. (2016) tutkimuksessa ilmeni vastaava ilmiö ja ilmakeivaus pienensikin kuitujen pinta-alaa yli 95 %.

Liukosellulla tulisi olla suurin ominaispinta-ala, koska ligniinin ja hemiselluloosan poistaminen lisää huokoisuutta (Stone ja Scallan 1965) ja liukosellusta on poistettu melkein kaikki ligniini ja hemiselluloosa. Toisaalta liukosellun valmistuksessa ja kuivauksessa tapahtuu myös paljon hornifikaatiota, mikä pienentää ominaispinta-alaa. Tutkimuksessa käytetyt liukosellut oli kuitenkin jo kertaalleen kuivattu, jolloin niiden ominaispinta-alat olivat matalampia kuin valkaisuamattomien ja kuivaamattomien sellujen. Havuliukosellun ominaispinta-ala oli $70 \text{ m}^2/\text{g}$ ja lehtiliukosellun $54,8 \text{ m}^2/\text{g}$, jotka ovat pienempiä, kuin Van De Ven ja Godboutin (2013) esittämä kaupallisen liukosellun ominaispinta-ala $89 \text{ m}^2/\text{g}$. Kuivaamattomien sellujen ominaispinta-alat ennen vaahtorainausa olivat suuria $141\text{--}191 \text{ m}^2/\text{g}$ verrattuna Kimuran ym. (2008) kuivaamattomien sellujen ominaispinta-aloihin $59,3\text{--}76,3 \text{ m}^2/\text{g}$.

Tuloksissa vaahtorainatulla ja kuivatulla havuliukosellulla onkin selkeästi suurin ominaispinta-ala, kun tarkastellaan pelkkiä havuselluja. Lehtiliukosellulla puolestaan on vain hieman korkeampi ominaispinta-ala kuin valkaistulla ja valkaisuamattomalla lehtipuusellulla, mutta selkeästi pienempi kuin happivalkaistulla lehtipuusellulla. Ominaispinta-ala ei kasvanut systemaattisesti ligniini- ja hemiselluloosapitoisuuden pienentyessä. Valkaisuukemikaalit ja ligniinin poistaminen voivat muuttaa soluseinän kemiallisia sidoksia, jolloin kuitujen välille voi syntyä uusia kemiallisia sidoksia, jotka sulkevat huokosia. Tällöin huokoisuus ja ominaispinta-ala laskevat. Lovikan ym. (2016) tutkimuksissa liukosellun huokoisuus oli jopa pienempi kuin tavallisen sulfaattisellun.

Huokosten keskihalkaisija vaihteli 7,6–9,2 nm välillä. Arvot ovat samaa suuruusluokkaa kuin Lovikan ym. (2016) tulokset. Huokoskoon kasvaessa ääniaaltojen ja huokosten seinämän välillä kitkan määrä vähenee ja ääniaaltojen heijastuminen takaisin kasvaa, mikä pienentää absorptiokerrointa (Beranek ja Istvan 1992). Kapokkipuiden kuiduilla tehdyillä kokeilla huomattiin, että pienellä huokoskoolla, mutta suurella huokoisuudella saatiin korkein absorptiokerroin matalilla taajuuksilla (Liu ym. 2016). Huokosten tilavuusjakaumasta nähdään kuitenkin, että huokosten koko ja tilavuus vaihtelevat paljon, jolloin keskihalkaisija ei kuvaa huokoskoon todellista painopistettä hyvin. Esimerkiksi happivalkeistun lehtipuusellun huokosten keskihalkaisija oli 7,4 mm, mutta huokosten tilavuusjakaumasta nähtiin, että halkaisijaltaan 2–3 mm huokosia on tilavuudeltaan eniten. Kuidun huokosten keskihalkaisijan vaikutusta näytteen absorptiokertoimeen ei siksi tässä tutkimuksessa määritellä.

6.4 Äänen absorptio

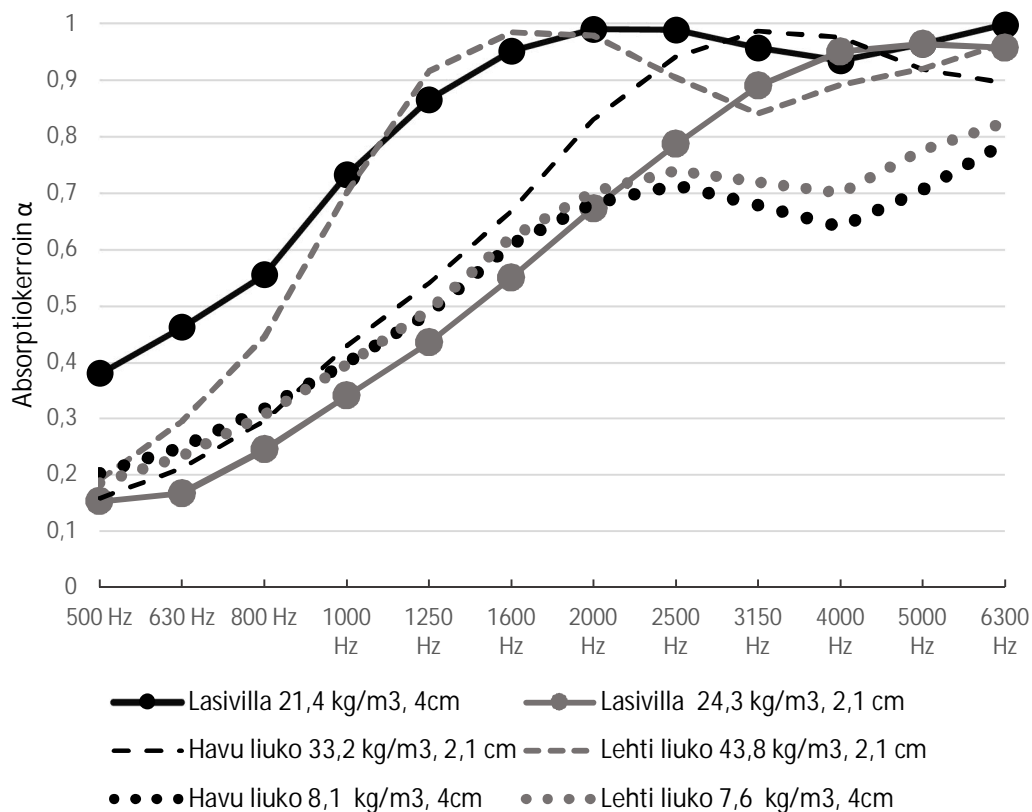
Erilaiset sellukuidut käyttäytyivät vaahdotuksessa ja kuivuessaan eri tavoin. Lyhyemmät lehtikuidut sijoittuivat helpommin lomittain, jolloin lehtipuukuitulevyistä tuli tiiviimpiä kuin havukuitulevyistä. Vaahdotettuja näytteitä ei saatu asettumaan samaan tiheyteen, vaikka valmistusprosessi olikin kaikille sama. Kuitujen erilaisten ominaisuuksien takia toiset sellut vaahtosivat enemmän kuin toiset, ja osa sellulevyistä myös hieman tiivistyi kuivumisen aikana. Tiheys vaikutti merkittävästi näytteiden äänen absorptioon, joten kaikkien näytteiden tiheyksien olisi pitänyt olla sama, jotta absorptiokertoimien vertailu olisi selkeämpää. Nyt on vaikeaa määritellä, vaikuttiko äänen absorptioon juuri tiheys vai jokin muu ominaisuus. Muutamalla näytteellä oli kuitenkin sama tiheys, jolloin hienorakenteen vaikutuksia voitiin tarkastella. Tiheyden vaikutus ei kuitenkaan ole täysin yksiselitteinen, sillä korkean tiheyden näytteissä havusellujen absorptiokertoimet olivat hyvin lähellä toisiaan, vaikka tiheyksien hajonta oli suurempaa kuin matalan tiheyden näytteillä, joilla absorptiokertoimissa oli enemmän eroja. Tiheyden vaikutus oli siis voimakkuudeltaan erilainen korkean- ja matalan tiheyden näytteillä. Näytteen tiheys vaikuttaa kuitenkin sen ominaisvirtausvastukseen, joten mittaamalla kaikkien näytteiden ominaisvirtausvastukset saataisiin lisää tietoa näytteiden ominaisuuksien eroista ja tiheyden vaikutuksesta absorptiokertoimeen.

Näytteistä tehtiin mahdollisimman homogeenisiä leikkaamalla tiivistymät pois näytteiden ylä- ja alapinnoista. Painovoima aiheutti kuitenkin sen, että kuidut pakkautuivat enemmän lähelle alapinnan viiraa kuin sellulevyn pintaa. Tämä näkyi korkean tiheyden näytteiden mittauksissa erona siinä, miten päin näyte asetettiin impendanssiputkeen. Ääniaallot pääsevät lähes ilman vastusta materiaalin sisään, kun materiaalin pinta ei ole kovin tiheä (Hongisto 2016). Kun tiheys kasvaa siirryttäessä syvemmälle näytettä ja näytteen impendanssi eli vastus kasvaa vähitellen, äänen absorptiokertoimen tulisi kasvaa matalilla taajuuksilla (Zhu ym. 2015). Sellulevynäytteissä tiheämpi puoli antoi kuitenkin korkeamman absorptiokertoimen. Tämä johtuu siitä, että ohut tiheä pintakerros toimii samoin kuin lasivillan pinnalla käytettävä suojakuori (Cox ym. 2009). Näytteiden tiheä pintakerros sekä lasivillan suojakuori toimivat kalvoina, jotka lisäävät näytteen massaa, jolloin absorptiokerroin matalilla taajuuksilla hieman kasvaa (Cox ym. 2009). Tutkimuksessa näytteistä valittiin aina korkeamman absorptiokertoimen antava tiheämpi puoli (Liite 4). Lehtipuuselluilla oli suurempi ero siinä, miten päin näyte asetettiin impendanssiputkeen kuin havuselluilla. Matalan tiheyden näytteissä näytteen ylä- ja alapinta antoivat saman absorptiokertoimen. Huoneenlämmössä säilytettyjen näytteiden kosteusprosentteissa saattoi olla pieniä eroavaisuuksia, mikä saattoi vaikuttaa absorptiokertoimiin, vaikka näytteitä säilytettiin samassa paikassa.

Absorptiokertoimia ja kuitujen hienorakenteen ominaisuuksia vertailemalla ei havaittu selkeää yhteyttä niiden välillä. Parhaiten vertailua voitiin tehdä näytteillä, joiden tiheys oli sama. Lyhytkuituiset lehtipuusellulevyt eivät absorboineet ääntä paremmin, kuin pitkäkuituiset havusellulevyt, kun niiden tiheys oli sama. Lyhyiden kuitujen pitäisi absorboida ääntä pitkiä kuituja paremmin matalilla taajuuksilla (Mohd Nor ym. 2010) (Koizumi ym. 2002). Tämän tutkimuksen tuloksissa esitettyjen absorptiokuvaajien perusteella lyhytkuituisten lehtipuusellujen absorptiokerroin ei ole merkittävästi korkeampi matalilla alle 2500 Hz taajuuksilla kuin havusellujen. Tulokset eivät siis tue aikaisempien tutkimusten tuloksia.

Kuitujen ominaispinta-ala ei kasvanut systemaattisesti ligniini- ja hemiselluloosapitoisuuden laskiessa. Sellujen, joiden ominaispinta-alat erosivat eniten toisistaan, absorptiokertoimissa ei ollut merkittävää eroa. Ominaispinta-alan, kemiallisen koostumuksen ja absorptiokertoimen välillä ei siis havaittu yhteyttä.

Sellulevynäytteiden absorptiokertoimeen ei merkittävästi vaikuttanut se oliko näyte tehty kuivatusta arkista vai kuivaamattomasta massasta. Esimerkiksi korkean tiheyden näytteissä arkitetun valkaistun havusellun absorptiokerroin ei eronnut kuivaamattoman valkaisemattoman havusellun absorptiokertoimesta. Liukosellujen korkea absorptiokerroin johtuu todennäköisesti jostakin muusta ominaisuudesta, jota ei tässä tutkimuksessa otettu huomioon. Matalan tiheyden näytteissä havu- ja lehtipuuliukosellujen tiheyksien ollessa lähellä toisiaan, absorptiokertoimien välillä ei ollut suuria eroja, vaikka havu- ja lehti-liukosellun kuidun pituus ja ominaispinta-ala erosivatkin toisistaan. Kuvassa 25 matalan ja korkean tiheyden liukoselluja verrataan saman kokoisiin lasivillanäytteisiin. Matalan tiheyden näytteissä (4 cm) lasivillan tiheys on selkeästi liukoselluja suurempi, jolloin sen absorptiokerroin on myös korkeampi. Korkean tiheyden näytteissä (2,1 cm) tilanne on päinvastoin. Kuvasta ei voida päätellä olisiko sellun vai lasivillan absorptiokerroin suurempi, jos näytteiden tiheys olisi sama. Tuloksista nähdään kuitenkin, että kasvattamalla liukosellun tiheyttä, saadaan sen absorptiokerroin korkeammalle kuin lasivillan.



Kuva 25. Liukosellujen ja samakokoisten lasivilla näytteiden absorptiokertoimet.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Absorptiokertoimen ja kuitujen ominaisuuksien välille ei voitu määritellä selkeitä yhteyksiä. Vaikka kuitujen ominaisuuksissa oli eroavaisuuksia, ei sellulevyjen absorptiokertoimissa ollut suuria eroja, jos näytteiden tiheys oli sama. Näytteistä suurimmalla osalla oli eri tiheydet, jolloin absorptiokertoimia ei voitu vertailla yksiselitteisesti. Vaikka tiheyksissä oli eroja, niin absorptiokertoimet olivat melko lähellä toisiaan. Varsinkin korkean tiheyden havusellujen absorptiokertoimet olivat hyvin lähellä toisiaan, vaikka niiden tiheys vaihteli 33,2–41,4 kg/m³ välillä. Matalan tiheyden havusellujen absorptiokertoimissa oli pieniä eroja, vaikka tiheyksien hajonta oli pienempää kuin korkean tiheyden näytteillä. Tiheys ei siis vaikuttanut kaikkiin näytteisiin samalla tavalla. Tiheyden lisäksi näytteiden äänen absorptiokykyyn voivat vaikuttaa myös muut ominaisuudet, joita ei tässä tutkimuksessa otettu huomioon, esimerkiksi ilman läpäisevyys ja kuidun elastisuus. Tulosten perusteella ei siis tiedetä, mikä ominaisuus vaikuttaa eniten äänen absorptioon tai onko ominaisuuksilla yhteisvaikutuksia. Tuloksista nähdään kuitenkin, että tiheys on yksi merkittävimmistä absorptiokerrointa kasvattavista ominaisuuksista. Kuidun pituuden, ominaispinta-alan, huokoskoon ja kemiallisen koostumuksen vaikutuksia absorptiokertoimeen on vaikea arvioida, sillä selkeitä yhteyksiä ominaisuuksien ja absorptiokertoimen välillä ei havaittu. Kaikkien näytteiden tiheyden tulisi olla sama, jotta muiden ominaisuuksien vaikutus nähtäisiin selkeämmin. Tarkempiin tuloksiin tarvitaan enemmän sellunäytteitä ja useampia tutkimustuloksia jokaisesta sellutyypistä.

Liukosellujen absorptiokertoimet olivat melko korkeat niiden matalista tiheyksistä huolimatta. Liukosellun korkeaan absorptiokertoimeen vaikuttavat todennäköisesti jotkut muut ominaisuudet, joita ei tässä tutkimuksessa huomioitu. Havu- ja lehtiliukosellun absorptiokertoimet erosivat vain vähän toisistaan, kun niiden tiheydet olivat lähellä toisiaan, joten mahdollisessa absorptiomateriaalissa voi käyttää kumpaa tahansa liukosellua. Liukosellun tiheyttä kasvattamalla sen absorptiokerroin saadaan korkeammaksi kuin lasivilan.

Absorptiomateriaalissa tulee ottaa huomioon sen paloalttius sekä kosteuden vaikutus materiaaliin. Sellua käytettäessä tulisi siihen lisätä jokin palonestoaine, jotta sitä voitaisiin käyttää rakennuksissa. Kosteuden kestävyyttä tulisi tutkia ja parantaa, jotta materiaali ei reagoisi muuttuviin olosuhteisiin ja pysyisi kestäväenä. Korkeimman absorptiokertoimen antavaan liukoselluun tulisi siis lisätä jotain palon- ja kosteudenestoainetta.

Seuraavissa tutkimuksissa voitaisiin tutkia vaahtorainatun sellun ominaisvirtausvastuksen, kosteuden ja kuitujen mekaanisten ominaisuuksien vaikutusta absorptiokertoimeen ja selvittää miksi liukoselluilla on korkeampi absorptiokerroin kuin muilla sellutyypeillä. Vaahtorainauksessa voitaisiin käyttää jotain muuta vaahdotusainetta ja nähdä miten kuidut käyttäytyvät, jos veden sijaan käytettäisiin polaaritonta liuotinta, esimerkiksi etanolia tai asetonia. Etanolin tai asetonin käyttö vähentää vetysidosten muodostumista, jolloin hornifikaation vaikutus kuituihin vähenee (Wang ym. 2003). Samalla kuitenkin kuitujen sitoutuminen toisiinsa heikkenee ja materiaalin mekaaniset ominaisuudet huonontuvat (Wang ym. 2003). Ilmakuivaus aiheutti kuitujen ominaispinta-alan merkittävän pienemisen. Hornifikaation vähentämiseksi voitaisiin kokeilla myös muita kuivaamismenetelmiä, esimerkiksi kylmäkuivausta. Sellulevynäytteet kannattaisi myös kuivata absoluuttisen kuiviksi ennen absorptiomittauksia, jotta kosteus ei vaikuta kuitujen ominaisuuksiin ja näin myös absorptiokertoimiin. Sopivan valmistusmenetelmän avulla sellulla on potentiaalia hyväksi absorptiomateriaaliksi.

8 LÄHTEET

- Al-Dajani, W. Tschirner, U. 2010. Pre-extraction of hemicelluloses and subsequent ASA and ASAM pulping: Comparison of autohydrolysis and alkaline extraction. *Holzforschung* 64(4): 411–416.
- Alén, R. 2000a. Structure and chemical composition of wood. Julkaisussa: Stenius, P.(toim.). *Forest Products Chemistry*. Fapet Oy. Helsinki. s 12–55.
- Alén, R. 2000b. Basic chemistry of wood delignification. Julkaisussa: P. Stenius. (toim). *Forest Products Chemistry*. Fapet Oy. Helsinki. s. 58–104.
- Barnes, G.T. & Gentle, I.R. 2005. Adsorption at the Gas-Solid Interface. Julkaisussa: *Interfacial Science - an Introduction*. Oxford University Press. s. 166–176.
- Beranek, L., Istvan, L. 1992. *Noise and Vibrational Control Engineering – principles and applications*. John Wiley & Sons Inc. 966 s.
- Berzings, V., J.E. Tasman. 1957. The relationship of the kappa number to the lignin content of pulp materials. *Pulp Paper Canada* 9: 154–158.
- Bismarck, A., Askargorta, I., Agranberri, S., Jurgen, L., Thomas, W., Bernhard, S., Artemis, S.I., Limbach, H.H. 2002. Surface characterization of flax, hemp

- and cellulose fibers; surface properties and the water uptake behaviour. *Polymer Composites* 23(5): 872–894.
- Buschow, K. J., Cahn, R. W., Flemings, M. C., Ilshner, B., Kramer, E. J., Mahajan, S. 2001. *Encyclopedia of materials. Science and technology* 1: 11.
- Ceccherini, S., Maloney, T. 2019 Assessing wood pulp reactivity through its rheological behavior under dissolution. *Cellulose* 26: 9877–9888.
- Choe, Hyeon & Sung, Giwook & Kim, Jung. 2017. Chemical treatment of wood fibers to enhance the sound absorption coefficient of flexible polyurethane composite foams. *Composites Science and Technology* 156: 19–27.
- Cox, T., Trevor, J., D'Antonio, P. 2009. *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*. Taylor and Francis. New York. USA. 405 s.
- Flickinger, P., Lammi, L., Ernerfeldt, E. Dissolving Pulp PEERS. 2011. [Verkkodokumentti] Saatavissa: <http://www.tappi.org/content/events/11diss/flickinger.pdf>. [Viitattu 30.3.2019].
- Futó, L. P. 1969. Qualitative und quantitative Ermittlung der Mikrozeigenshaften von Holz. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 27(5): 192–201.
- Gullichsen, Johan & Paulapuro, Hannu. 2000. *Papermaking Science and Technology*. Fapet Oy. Gummerus Printing. Jyväskylä. 142 s.
- Hongisto, V. 2016. *Meluntorjunta*. Aalto-yliopisto. Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos.
- ISO, E. N. 10534-2: 2001. *Acoustics-Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes-Part 2: 10534–2*.
- Isotalo, K. 1990. *Puu- ja sellukemia*. Valtion painatuskeskus. Helsinki. 144 s.
- Jahangiri, P., Logawa, B., Korehei, R., Hodgson, M., Martinez, D. M., Olson, J. A. 2016. On acoustical properties of novel foam-formed cellulose-based material. *Nordic Pulp & Paper Research Journal* 31(1): 14–19.
- Jensen W. 1977. *Puukemia*. Suomen paperi-insinöörien yhdistys. Turku. 443 s.
- Jääskeläinen, A. S., & Sundqvist, H. (2007). *Puun rakenne ja kemia*. Otatieto. Helsinki. 142 s.
- Kennedy, R. W., & Ifju, G. 1962. Applications of microtensile testing to thin wood sections. *Tappi* 45(9): 725–733.
- Kimura, M., Kimura, S., Qi, Z., Kuga, S., & Isogai, A. 2013. Porous structure of never-dried pulp fibers analysed by nitrogen adsorption method by. *Advances in Pulp and Paper Research*. s. 821–836.
- Know Pulp. [Verkkodokumentti] Saatavissa: <http://www.knowpulp.com/> [Viitattu: 25.3.2019].

- Koizumi, T., Tsujiuchi, N., Adachi, A. 2002. The development of sound absorbing materials using natural bamboo fibers. *High Performance Structures and Materials* 4: 157–166.
- Kylliäinen, M. (2006). Talonrakentamisen akustiikka. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetekniikan laitos. Tutkimusraportti. 137 s.
- Kärkkäinen, M. 2003. Puutieteen perusteet. Metsälehti. Hämeenlinna. 451 s.
- Laivins, G.V., Scallan, A.M. 1993. The Mechanism of Hornification of Wood Pulps. Julkaisussa: *Products of Papermaking: Transactions of the 10th Fundamental Research Symposium Oxford, Vol. 2. (toim.). Baker, C.F. Pira International. UK. s. 1235–1260.*
- Lappalainen, T., & Lehmonen, J. 2012. Determinations of bubble size distribution of foam-fibre mixture using circular hough transform. *Nordic Pulp and Paper Research Journal* 27(5): 930–939.
- Liu P.S., Chen G.F. 2014. Chapter Nine - Characterization Methods: Basic Factors, Editor(s): P.S. Liu, G.F. Chen. *Porous Materials*, Butterworth-Heinemann. s. 411–492.
- Liu, X., Yan X. & Zhang H. 2016. Effects of pore structure on sound absorption of kapok based fiber nonwoven fabrics at low frequency. *Textile Research Journal* 86(7): 739–748.
- Lovikka, V. A., Khanjani, P., Väisänen, S., Vuorinen, T., & Maloney, T. C. 2016. Porosity of wood pulp fibers in the wet and highly open dry state. *Microporous and Mesoporous Materials* 234: 326–335.
- Maloney T. C., Li T.-Q., Weise U. & Paulapuro H. 1997. Intra- and inter-fibre pore closure in wet pressing. *Appita Journal* 50(4): 301–306.
- Maloney, T. C., Paulapuro, H. 1999. The formation of pores in the cell wall. *Journal of pulp and paper science* 25(12): 430–436.
- Maloney, T.C. 2000. On the pore structure and dewatering properties of the pulp fiber cell wall. *Acta Polytechnica Scandinavica Chemical technology series* (275): 9.
- Mohd Nor, M. J., Ayub, M., Zulkifli, R., Amin, N., & Fouladi, M. H. 2010. Effect of different factors on the acoustic absorption of coir fiber. *Journal of Applied Sciences*, 10(22): 2887–2892.
- Moon, R. J., Martini, A., Nairn, J., Simonsen, J., & Youngblood, J. 2011. Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites. *Chemical Society Reviews* 40(7): 3941–3994.

- Mörseburg, K., Hultholm, T., Lundin, T., & Lönnberg, B. 1999. Experiences with the Kajaani FiberLab® Analyzer in determining morphological characteristics of mechanical and chemical pulps. [Verkkodokumentti] Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/261286933_Experiences_with_the_Kajaani_FiberLab_Analyzer_in_determining_morphological_characteristics_of_mechanical_and_chemical_pulps. [Viitattu 16.9.2019].
- Nousiainen, E., & Hongisto, V. 2001. Huokoisten materiaalien absorptiosuhteen laskeminen virtausvastuksen perusteella. Akustiikkapäivät 2001. Espoo.
- Page, D. H., El-Hosseiny, F., Winkler, K., & Bain, R. 1972. The mechanical properties of single wood-pulp fibres. Part I: A new approach. *Pulp and Paper Magazine of Canada* 73(8): 72–77.
- Panshin, A. J. & De Zeeuw, C. 1970. Textbook of wood technology: Volume 1, Structure, identification, uses, and properties of the commercial woods of the United States and Canada (3rd ed.). McGraw-Hill Book Company. New York. 705 s.
- Pöhler, T., Jetsu, P., & Isomoisio, H. 2015. Uusi akustinen vaahtorainattu luonnonkuitu materiaali. Akustiikkapäivät 2015.
- Pöhler, T., Jetsu, P., & Isomoisio, H. 2016. Benchmarking new wood fibre-based sound absorbing material made with a foam-forming technique. *Building Acoustics* 23(3–4): 131–143.
- Saracci, R., & Simonato, L. 1982. Man-made vitreous fibers and workers' health: An overview of the epidemiologic evidence. *Scandinavian journal of work, environment & health*: 234–242.
- Saranpää, P. 1997. Puun rakenne, ominaisuudet ja kasvu. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/1997.
- Scallan, A. M., & Green, H. V. 2007. The effect of pulping upon the dimensions of wood tracheids. *Wood and Fiber Science* 7(3): 226–233.
- Sixta, H. Handbook of Pulp. 2006. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. 1368 s.
- Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., & Crocker, D. 2008. Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass. Laboratory analytical procedure 1617: 1–16.
- Stone J.E., Scallan A.M. 1965. Effect of component removal upon the porous structure of the cell wall of wood. *J. Polymer Science Part C* 11: 13–25.
- Thommes, M., Kaneko, K., Neimar, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., Sing, K. S.W. 2015. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report), *Pure and Applied Chemistry*. Volume 87(9–10): 1051–1069.

- Tyrväinen, J. 1995. Wood and fiber properties of Norway spruce and its suitability for thermomechanical pulping. *Acta Forestalia Fennica* 249. 155 s.
- Van De Ven, T. G. ja Godbout, L. 2013. *Cellulose: Fundamental Aspects*. BoD–Books on Demand. Croatia. 366 s.
- Wang X., Maloney T.C., Paulapuro H. 2003. Internal fibrillation in never-dried and once-dried chemical pulps. *Appita Journal* 56(6): 455–459.
- Wassilieff, C. 1996. Sound absorption of wood-based materials. *Applied Acoustics*, 48(4): 339–356.
- Weatherwax, R. C. 1977. Collapse of cell-wall pores during drying of cellulose. *Journal of Colloid and Interface Science* 62(3): 432–446.
- Wikberg H. & Maunu S.L. 2003. Selluloosan monimuotoisuus. [Verkkodokumentti] Saatavissa: <http://www.helsinki.fi/kemmi/data/kemmi/kumpulassa/selluloosa.pdf> [Viitattu 20.3.2019].
- Välimaa S. 2014. Puun kuitujen hyödyntäminen. [Verkkodokumentti] Saatavissa: <http://spotidoc.com/doc/3503355/puun-kuitujen-hy%C3%B6dynt%C3%A4minen> [Viitattu 16.3.2019].
- Xi, E. 2018. Dynamic relationship between mechanical properties and chemical composition distribution of wood cell walls. *Wood Research* 63: 179–192.
- Zhu, W., Nandikolla, V., & George, B. 2015. Effect of bulk density on the acoustic performance of thermally bonded nonwovens. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* 10(3).

LIITTEET

Liite 1. Sellujen kemiallinen koostumus.

%	Selluloosa	Hemiselluloosa	Ligniini
Lehti valkaisematon	67	29,3	3,7
Lehti happivalkaistu	68,8	28,9	2,3
Lehti valkaistu	70,2	28,8	1
Lehti liukosellu	93,9	5,4	0,7
Havu valkaisematon	73,7	18,7	7,6
Havu happivalkaistu	76,4	19,9	3,8
Havu valkaistu	82,7	16,5	0,9
Havu liukosellu	92,5	6,7	0,8

Liite 2. Sellujen ominaispinta-alat ja keskihalkaisijat.

	Pinta-ala m ² /g	Huokosen keskihalkai- sija nm
Lehti valkaisematon	1,41	9,18
Lehti happivalkaistu	1,88	7,42
Lehti valkaistu	1,46	7,95
Lehti liukosellu	1,53	8,54
Havu valkaisematon	1,42	7,59
Havu happivalkaistu	1,33	8,23
Havu valkaistu	0,88	7,60
Havu liukosellu	1,78	7,62

Liite 3. Tuloksissa käytettyjen sellulevynäytteiden ja lasivillojen absorptiokertoimet

	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz
Havu valkaisematon 9,2 kg/m ³	0,16337	0,1955	0,24842	0,31803	0,4606	0,48228	0,5722	0,65534	0,74253	0,7583	0,70235	0,68518
Lehti valkaisematon 9,2 kg/m ³	0,16398	0,20082	0,25655	0,32615	0,48874	0,50833	0,59682	0,65728	0,70363	0,71618	0,67635	0,70096
Havu happivalkaistu 12,2 kg/m ³	0,19478	0,24481	0,31978	0,41534	0,59249	0,61268	0,71761	0,77778	0,81664	0,80162	0,77156	0,81059
Lehti happivalkaistu 8,7 kg/m ³	0,15572	0,18876	0,24569	0,32221	0,46632	0,49157	0,57832	0,63502	0,70563	0,72436	0,70364	0,72084
Lehti valkaistu 11,7 kg/m ³	0,16733	0,20701	0,27308	0,37343	0,50977	0,55477	0,67702	0,75857	0,83479	0,82027	0,78066	0,79666
Havu valkaistu 8,7 kg/m ³	0,174	0,20705	0,25785	0,3187	0,38268	0,4887	0,56926	0,62459	0,63343	0,62371	0,66924	0,74312
Havu liuko 8,1 kg/m ³	0,20222	0,24823	0,31697	0,39895	0,4862	0,60853	0,68093	0,7131	0,67785	0,63881	0,70541	0,78828
Lehti liuko 7,6 kg/m ³	0,18499	0,23274	0,30581	0,39492	0,49131	0,62131	0,70158	0,73966	0,71859	0,6996	0,77573	0,82491
Lehti valkaisematon 44,4 kg/m ³	0,15847	0,23507	0,37251	0,57098	0,68824	0,8503	0,97308	0,99872	0,97244	0,94976	0,91395	0,92929
Lehtihappivalkaistu 51,4 kg/m ³	0,18734	0,27607	0,42615	0,58091	0,77215	0,89576	0,99201	0,98503	0,93659	0,9201	0,89872	0,94343
Lehtivalkaistu 53,9 kg/m ³	0,18321	0,26093	0,39384	0,59116	0,69497	0,8644	0,98261	0,99235	0,94855	0,93931	0,94133	0,98346
Lehtiliuko 43,8 kg/m ³	0,19077	0,29389	0,44338	0,70043	0,91564	0,98448	0,97907	0,90393	0,84062	0,89189	0,91967	0,964
Havuvalkaisematon 38,4 kg/m ³	0,15467	0,21445	0,30977	0,45135	0,56368	0,68816	0,84814	0,95318	0,99425	0,98348	0,93398	0,91532
Havuhappivalkaistu 41,4 kg/m ³	0,15376	0,20146	0,28604	0,43109	0,55056	0,69053	0,85987	0,96598	0,99876	0,98263	0,92047	0,87012
Havuvalkaistu 38,7 kg/m ³	0,15368	0,19814	0,29103	0,42026	0,5297	0,65679	0,82262	0,93979	0,99045	0,9822	0,93629	0,90902
Havuliuko 33,2 kg/m ³	0,15781	0,21079	0,29546	0,42848	0,53874	0,6681	0,83034	0,94142	0,98669	0,97532	0,91887	0,89466
Lasivilla 21,4 kg/m ³ , 4cm	0,378833	0,460562	0,553737	0,731347	0,863821	0,950498	0,988911	0,988294	0,956707	0,933125	0,963465	0,997737
Lasivilla 24,3 kg/m ³ , 2,1 cm	0,151996	0,166093	0,244321	0,339868	0,433922	0,549136	0,671895	0,785951	0,889704	0,950396	0,963714	0,957039

Liite 4. Korkean tiheyden näytteiden ylä- ja alapintojen absorptiokertoimet

2,1 cm	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz
Lehti valkaisematon 44,4 kg/m ³ -Vaihtu	0,1584731	0,2350728	0,3725051	0,57098288	0,668245	0,8503045	0,97308012	0,998723	0,9724406	0,9497584	0,91395339	0,9292868
Lehti valkaisematon 44,4 kg/m ³ -Hyväty	0,1529066	0,2221501	0,351196	0,54571497	0,700759	0,8083563	0,96240028	0,999085	0,9760915	0,9504409	0,91010052	0,9147404
Lehtihappivalkaistu 51,4 kg/m ³ -Vaihtu	0,1873416	0,2760651	0,4261542	0,58090624	0,772148	0,8957644	0,9920114	0,985034	0,9365945	0,9201015	0,89871688	0,9434293
Lehtihappivalkaistu 51,4 kg/m ³ -Hyväty	0,1548552	0,2134648	0,3134075	0,44671254	0,5940003	0,7335776	0,89998527	0,986177	0,9970952	0,9806061	0,97158543	0,9801224
Lehtivalkaistu 53,9 kg/m ³ -Vaihtu	0,1832099	0,2609261	0,3938434	0,59115891	0,6949654	0,8644011	0,98261444	0,992352	0,9485504	0,9393109	0,94132564	0,98346
Lehtivalkaistu 53,9 kg/m ³ -Hyväty	0,1833395	0,2583526	0,3909696	0,5874579	0,685624	0,8630046	0,98145789	0,993873	0,9508083	0,9344987	0,92702671	0,9689235
Lehtiliuko 43,8 kg/m ³ -Vaihtu	0,1907652	0,2938886	0,4433835	0,70042693	0,9156361	0,9844781	0,97906999	0,903934	0,8406199	0,8918903	0,91967166	0,9639977
Lehtiliuko 43,8 kg/m ³ -Hyväty	0,1640104	0,2253602	0,3344462	0,53800155	0,7385455	0,8745541	0,98913009	0,988022	0,9263619	0,9363947	0,96155103	0,9910228
Havuvalkaisematon 38,4 kg/m ³ -Vaihtu	0,1546651	0,2144466	0,3097721	0,45134528	0,5636806	0,6881604	0,84814164	0,95318	0,9942512	0,9834818	0,93397599	0,9153244
Havuvalkaisematon 38,4 kg/m ³ -Hyväty	0,1382915	0,1862983	0,2682804	0,3871929	0,4837243	0,6076596	0,77344281	0,902254	0,9656273	0,9868592	0,95281163	0,9297788
Havuhappivalkaistu 41,4 kg/m ³ -Vaihtu	0,1537624	0,2014568	0,286036	0,43109131	0,5505603	0,6905342	0,85986979	0,965976	0,9987629	0,9826328	0,92047174	0,8701246
Havuhappivalkaistu 41,4 kg/m ³ -Hyväty	0,1484117	0,200899	0,2905476	0,43211688	0,546142	0,6858787	0,85379267	0,955189	0,9930638	0,9830569	0,95665983	0,9727797
Havuvalkaistu 38,7 kg/m ³ -Vaihtu	0,1536847	0,1981363	0,2910297	0,42026129	0,5299695	0,6567853	0,82262037	0,939793	0,9904511	0,9821967	0,936289	0,9090201
Havuvalkaistu 38,7 kg/m ³ -Hyväty	0,1505093	0,1989099	0,292259	0,42687115	0,5413558	0,6618012	0,82995897	0,942936	0,9925483	0,9796627	0,93773282	0,9223011
Havuliuko 33,2 kg/m ³ -Vaihtu	0,1578066	0,2107911	0,2954635	0,42848086	0,5387417	0,6681026	0,83033685	0,94142	0,9866889	0,9753303	0,91887458	0,8946648
Havuliuko 33,2 kg/m ³ -Hyväty	0,1524288	0,2004325	0,2787817	0,40220225	0,5038436	0,6296739	0,79539179	0,916827	0,9742898	0,9758414	0,93626777	0,9318124